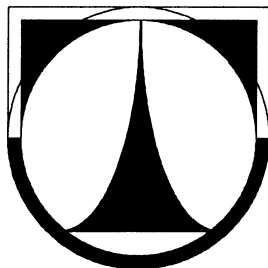


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**NÁVRH VODNÍHO CHLAZENÍ NÍZKOTLAKÝCH SNÍMAČŮ  
VE VÝFUKOVÉM TRAKTU MOTORU**

**DESIGN OF WATER COOLING UNIT FOR LOW-  
PRESSURE SENSORS IN THE EXHAUST TRACT OF  
ENGINE**

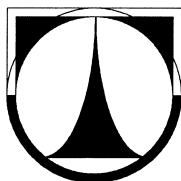
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Markéta Morávková

Červen 2009

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA STROJNÍ  
Katedra vozidel a motorů



Studijní program  
M2301 Strojní inženýrství

Obor  
2302T010  
Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření  
Pístové spalovací motory

## **NÁVRH VODNÍHO CHLAZENÍ NÍZKOTLAKÝCH SNÍMAČŮ VE VÝFUKOVÉM TRAKTU MOTORU**

### **DESIGN OF WATER COOLING UNIT FOR LOW- PRESSURE SENSORS IN THE EXHAUST TRACT OF ENGINE**

Diplomová práce

KVM – DP – 591  
Markéta Morávková

Vedoucí diplomové práce:  
Konzultant diplomové práce:

Ing. Josef Blažek, Ph.D.  
Doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.

Počet stran: 53  
Počet obrázků: 23  
Počet příloh: 9  
Počet tabulek: 10

Červen 2009

Místo pro vložení originálního zadání DP

## **Téma**

# **NÁVRH VODNÍHO CHLAZENÍ NÍZKOTLAKÝCH SNÍMAČŮ VE VÝFUKOVÉM TRAKTU MOTORU**

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá především problematikou indikace tlaku v sacím a výfukovém potrubí a s tím spojeném chlazením nízkotlakých snímačů.

Pozornost je věnována návrhu a vhodnému uspořádání chladicího systému, který by vyhovoval požadavkům dnešních nízkotlakých snímačů. Práce obsahuje jak teoretický výpočet prostřednictvím simulačního software (dále jen SW), tak ověření jeho schopnosti na realizovaném zkušebním zařízení na motoru Škoda 1.2 HTP.

## **Klíčová slova**

Indikace tlaku, vodní chlazení, piezorezistivní, piezoelektrický, snímač

## **Title**

# **DESIGN OF WATER COOLING UNIT FOR LOW-PRESSURE SENSORS IN THE EXHAUST TRACT OF ENGINE**

## **Annotation**

This thesis deals mostly with problematic of a low-pressure indication in the intake and exhaust tract and associated problems of cooling low-pressure sensors.

Special attention is paid to proper design and layout of cooling system that would meet the requirements of today's low-pressure sensors. The work includes both theoretical calculation by means of simulation software (hereinafter referred to as SW), thus verifying its ability to realized the engine test facility at Skoda 1.2 HTP.

## **Key words**

Pressure indication, water cooling, piezoelectric, piezoresistive, transducer

Desetinné třídění:

621.43.01

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2009

Archivní označení zprávy:

## **Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 5.6.2009

.....  
Markéta Morávková

## **Poděkování**

Touto cestou děkuji Ing. Josefu Blažkovi, Ph.D. za cenné rady, odbornou pomoc, názory a připomínky při realizaci mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Doc. Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D. za umožnění této diplomové práce a své rodině za podporu při studiu.

# OBSAH

1	Seznam základních symbolů a jednotek.....	9
2	Úvod.....	11
3	Studijní a řešeršní část.....	12
3.1	Cíl diplomové práce .....	12
3.2	Nízkotlaká indikace tlaku v sacím a výfukovém potrubí.....	12
3.2.1	Měření tlaku v sacím potrubí.....	14
3.2.2	Měření tlaku ve výfukovém potrubí.....	15
3.3	Chlazení snímačů.....	15
3.3.1	Chlazení ve výfukovém potrubí.....	16
4	Snímače tlaku .....	17
4.1	Snímače absolutního tlaku – Piezorezistivní snímače.....	17
4.1.1	Fyzikální základ piezorezistivního měření tlaku .....	17
4.1.2	Statické a dynamické vlastnosti .....	19
4.1.3	Úprava signálu.....	19
4.1.4	Korekce na nulový bod: .....	20
4.1.5	Hlavní výhody piezorezistivních snímačů s křemíkovým plátkem: .....	21
4.2	Snímače změny tlaku – Piezoelektrické snímače .....	21
4.2.1	Fyzikální základ piezoelektrického měření tlaku.....	21
4.2.2	Dynamická charakteristika snímače .....	23
4.2.3	Výstup – náboj a napětí.....	24
5	Konstrukční uspořádání vodního chlazení .....	26
5.1	Popis jednotlivých částí systému .....	26
5.1.1	Nádrž s destilovanou vodou .....	26
5.1.2	Čerpací jednotka APO 040.....	27
5.1.3	Napájení .....	27
5.1.4	Rozvod chladicí kapaliny .....	28
6	Výpočet tepelného namáhání snímačů .....	29
6.1	Základy technické termodynamiky pro PSM).....	29
6.2	Software ProENGINEER Wildfire 4.0 .....	31
6.3	Výpočetní model v software ProENGINEER .....	32
6.3.1	3D modely pro simulaci.....	33
6.4	Rozbor tepelného zatížení.....	36
6.4.1	Součinitel přestupu tepla .....	36
6.4.2	Okrajové podmínky pro simulaci .....	38
6.5	Výsledky PC simulace v několika provozních režimech:.....	39
6.5.1	Simulace 1.....	39
6.5.2	Simulace 2.....	42
6.5.3	Simulace 3.....	43
7	Experimentální měření vzorku vodního chlazení .....	44
7.1	Snímače na výfukovém potrubí .....	44
7.2	Měřicí řetězec a jeho přesnost .....	45
7.2.1	Motor.....	46
7.2.2	Dynamometr MEZServis ASD 235 M250.....	46
7.2.3	Snímač otáček a polohy klikového hřídele .....	48
7.2.4	Infračervený teploměr CEM DT – 8819 .....	48

7.2.5	AVL Indimeter 619 .....	48
7.3	Vlastní měření.....	48
7.4	Porovnání naměřených hodnot a simulace .....	51
8	Závěr .....	52
9	Použitá literatura .....	53



## 1 Seznam základních symbolů a jednotek

symbol	Název	jednotka
n	Otáčky motoru	[1/min]
e	Kompresní poměr	[-]
D	Vrtání	[mm]
Z	Zdvih	[mm]
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> k]
f	Frekvence	[Hz]
a	Rychlost zvuku v daném prostředí	[m/s]
V	Objem	[m <sup>3</sup> ]
l	Charakteristická délka	[m]
R	Molární plynová konstanta	[J/Kmol]
$\chi$	Poissonova konstanta	[-]
T	Termodynamická teplota	[K]
T <sub>n</sub>	Libovolná termodynamická teplota	[K]
Q	Náboj	[pC]
U	Napětí	[V]
S	Teplosměnná plocha	[m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Součinitel vedení tepla ve stěně	[W/mK]
$\delta_2$	Tloušťka stěny	[m]
C <sub>s</sub>	Součinitel sálání	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\beta$	Teplotní součinitel sálání	[K <sup>3</sup> ]
I	Proud	[A]
M <sub>t</sub>	Kroutící moment	[Mn]
t	Teplota	[°C]
p <sub>vp</sub>	Tlak výfukových plynů	[Mpa]
c	Střední rychlost proudění	[m/s]
Q	Objemový průtok	[m <sup>3</sup> /s]
$\nu$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /sc]
$\eta$	Dynamická viskozita	[Pa.s]
c <sub>p</sub>	Měrné teplo při p= konst.	[J/kg.pK]
$\rho$	Měrná hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha'$	Součinitel objemové roztažnosti	[1/K]
$\Delta T$	Teplotní spád	[K]
g	Tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
Re	Reynolsovo číslo	[-]

Nu	Nusseltovo číslo	[-]
Pr	Prandltovo číslo	[-]
Gr	Grashoffovo číslo	[-]
$R_{inp}$	Odpor zesilovače	[ $\Omega$ ]

## Zkratky

ANSYS	Programový systém	
FEM	Metoda konečných prvků	
CAE	Počítačově podporovaná konstrukce	
SW	Software PC	
HW	Hardware PC	
PC	Osobní počítač	
ICP	Integrovaný piezoelektrický obvod	
PLC	Programovatelný průmyslový počítač	
PTFE	Teflon	
A/D	Analogovo digitální	
KH	Klikový hřídel	
NI	Nízkotlaká indikace	
OHC	Ventilový rozvod	
HÚ	Horní úvrať	
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen	
DP	Diplomová práce	
CNG	Stlačený zemní plyn	
LPG	Zkapalněný rafinérský plyn	
ŘJ	Elektronická řídicí jednotka motoru	
TUL	Technická univerzita Liberec	

## 2 Úvod

Výměna obsahu válce spalovacích motorů do značné míry ovlivňuje emise a spotřebu paliva. Analýza a optimalizace pro výměnu obsahu válců má zásadní význam. Měření tlaku v sacím a výfukovém potrubí pomocí nízkotlakého piezorezistivního či piezoelektrického snímače tlaku se stalo důležitým nástrojem pro navrhování a optimalizaci výměny obsahu válců, analýzy procesu a simulaci.

Již roku 1963 rakouská společnost AVL uvedla na trh snímače tlaku pro indikaci tlaku ve spalovacím prostoru. Od té doby mnoho snímačů zlepšovalo své vlastnosti (přesnost a životnost). Intenzivní vývojové práce s využitím výpočtů a konstrukčních metod úrovně techniky své doby neustále zlepšovaly výrobní procesy. V současné době jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost a citlivost piezoelektrických a piezorezistivních snímačů v extrémních podmínkách, kterými jsou vysoká teplota výfukových plynů a teplota ve spalovacím prostoru při výměně obsahu válců. Každý výrobce zařízení pro monitorování tlaku má své know-how, což se odráží v nesrovnatelných měřících vlastnostech snímačů, snadné instalaci, ať už přímo nebo prostřednictvím adaptéru a v komplexním příslušenství.

Mým úkolem v této diplomové práci bylo navrhnout funkční, optimální a cenově přijatelné řešení pro chlazení těchto snímačů. Inspirací pro mne byla chladicí jednotka rakouské firmy AVL. Tato jednotka poskytuje chlazení pro větší množství těchto snímačů najednou, což vede k jejím větším rozměrům a výkonové náročnosti na čerpání rozvod kapaliny. Má konstrukce je navržena pro zapojení max. 3 snímačů či chladících adaptérů (a je tedy kompaktnější) a používá levné čerpadlo chladicí kapaliny.

## **3 Studijní a řešeršní část**

### **3.1 Cíl diplomové práce**

Zadání této diplomové práce vzniklo z podnětu TUL v Liberci a jejím cílem bylo zhotovení nového vodního chlazení nízkotlakých snímačů.

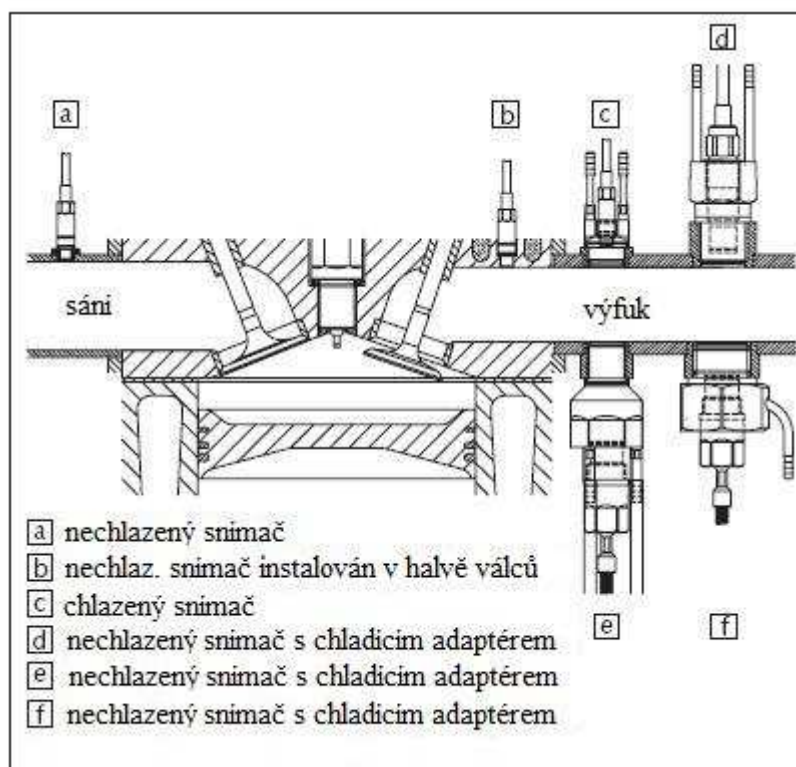
Dále tato práce obsahuje studijní a řešeršní část, která se zabývá především způsoby chlazení, tepelným namáháním těchto snímačů a vlivem teploty chladící kapaliny na velikost teploty v oblasti citlivých transdukčních prvků.

### **3.2 Nízkotlaká indikace tlaku v sacím a výfukovém potrubí**

Indikace nízkého tlaku je měření nízké amplitudy tlaků v závislosti na poloze klikového hřídele. Obvykle se jedná o rozmezí 0 až 5 barů. Prvotním základem pro nízkotlakou indikaci je dynamické měření velmi malé změny tlaku kolem několika barů. Předním záměrem je měření současně dynamických změn a absolutního tlaku s vysokou přesností. Obě tyto tlakové charakteristiky jsou základními údaji pro simulaci a optimalizaci motorů.

Měření tlaku v sacím a výfukovém potrubí je důležité pro analýzu výměny obsahu válce. Volba místa měření je především dána samotnou konstrukcí motoru, tedy jeho přístupností.

Maximální provozní teplota piezorezistivního snímače pro indikaci nízkého tlaku je často nižší, než je tomu u měřeného média. Dlouhodobé měření je třeba pouze snímačem s vodním chlazením nebo s použitím chladícího adaptéru. Požadovaná přesnost měření absolutního tlaku v sání a výfuku je vyčíslena na  $\pm 1$  mbar. Obrázek uvádí několik alternativ při instalaci snímačů absolutního tlaku v sacím nebo výfukovém potrubí spalovacího motoru.



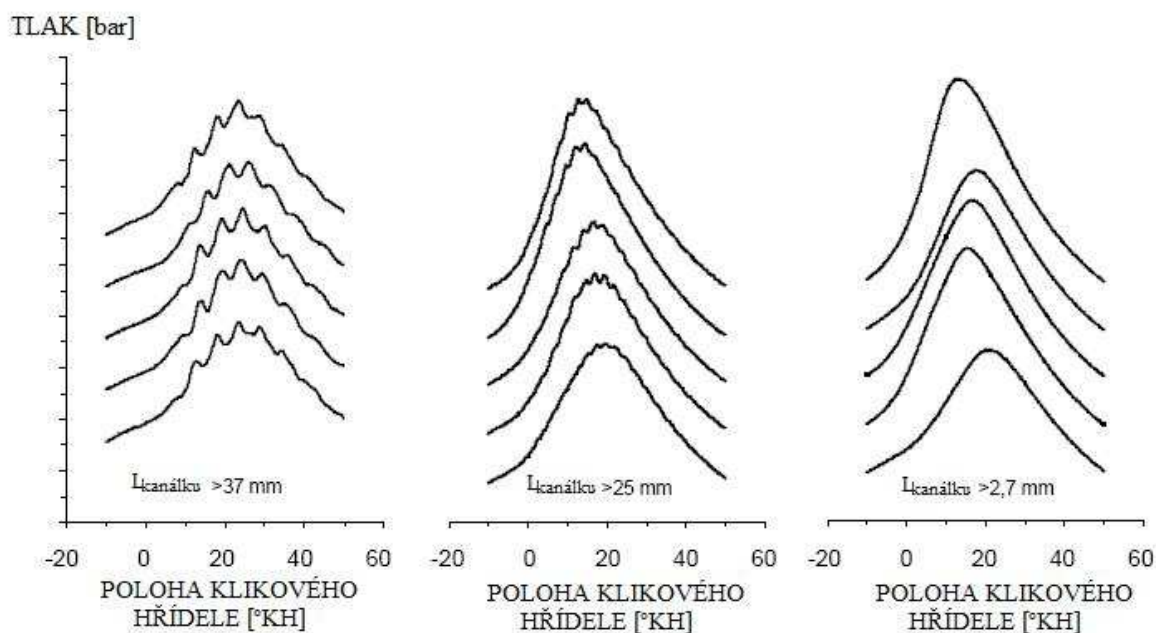
**Obr. 1. Různé možnosti zabudování snímačů ve výfukovém a sacím potrubí [1]**

Důležitým kritériem je správná instalace snímače na zkušebním motoru, protože umístění definuje provozní podmínky během měření (proudění tepla, teplotní zatížení, akcelerace a podob.). Při instalaci je nutno uvažovat především vliv teploty (mění se citlivost piezoelektrického snímače), elektromagnetické rušení a délky přívodního kanálu, pokud měříme rychle se měnící tlak, je nutno volit délku přívodního kanálku tak, aby maximální měřená frekvence ( $n$ -tá harmonická základní frekvence) byla podstatně nižší než rezonanční kmitočet kanálku:

$$f = \frac{a}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}} \quad f = \frac{\sqrt{\chi \cdot R \cdot T}}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{r^2 \pi}{V \cdot l}}$$

kde  $a$  je rychlost zvuku v daném prostředí,  $S$  plocha kanálku,  $V$  objem prostoru před membránou a  $l$  délka kanálku.

**Obr. 2** zobrazuje průběhy tlaků při různých délkách kanálku. Těchto pět křivek pro každou délku kanálku je výsledkem jediného cyklu měření. Pro jasnější přehled byly posunuty na jinou úroveň.



**Obr. 2 Vliv délky indikačního kanálku ( $L_{kanáliku}$ ) na tvar křivky průběhu tlaku [<sup>2</sup>]**

### 3.2.1 Měření tlaku v sacím potrubí

Vzhledem k omezené přístupnosti a rozměrům sacího potrubí je malý rozměr senzoru jeho hlavním požadavkem. Tyto požadavky splňují miniaturizované snímače, které se hodí pro přímou instalaci na sací potrubí nebo do hlavy válců. Kromě těchto úvah je nutné brát v potaz i teploty měřeného média, které v sacím potrubí mohou dosahovat teplot až 120 °C, zejména při recirkulaci výfukových plynů. Snímač jsou schopny odolat těmto teplotám bez jeho dodatečného chlazení, popřípadě vybaveny chladičím adaptérem. Použitím chladičím adaptéru prodlužuje životnost snímače a zajišťuje možnost korekce na nulový bod. Další velkou výhodou malého rozměru (závit M5) je, že hlava senzoru může být zapuštěna do vnitřního povrchu sacího kanálu.

Tlak v sacím potrubí je snímán snímačem připojeným na vhodném místě k sacímu potrubí za škrtkovou klapkou. Absolutní tlak v sacím potrubí je vždy menší než okolní atmosférický tlak. Jako hlavní řídicí veličinou pro dávkování paliva je použito právě absolutního tlaku v sacím potrubí.

### 3.2.2 Měření tlaku ve výfukovém potrubí

Ve výfukovém potrubí je dosahováno mnohem vyšších teplot (i nad 1000 °C), což vyžaduje aktivní chlazení senzoru. Použitím jednoduchého chladicího adaptéru se sice ochladí kryt snímače, ale měřicí membrána je stále vystavována vysokým teplotám. Ve takovýchto chladících adaptérech je spínací mechanismus, který je otevírán pneumatickým ventilem pouze během měření. To maximalizuje životnost snímače a umožňuje korekci nulového bodu během měření. Snímače s tenkou ocelovou izolací membrány zajišťují odolnost proti emisím a případně sazím.

Při měření tlaku na výfukovém potrubí je nutno použít chladicí adaptér nebo snímač s chladícími kanálky. Použití chladicího adaptéru umožňuje přesnou korekci na nulový bod, a tudíž může být dosaženo přesnosti měření ( $\pm 1$  mbar) ve všech provozních podmínkách.

Jakékoli měření tlaku ve výfukovém potrubí může být náročné, proto při výběru umístění snímače není brán zřetel pouze na jeho rozměry, ale také na geometrii výfukového potrubí. Dynamický tlak měřený v různém umístění snímače může být ovlivněn určitou orientací snímače vzhledem ke směru toku výfukových plynů.

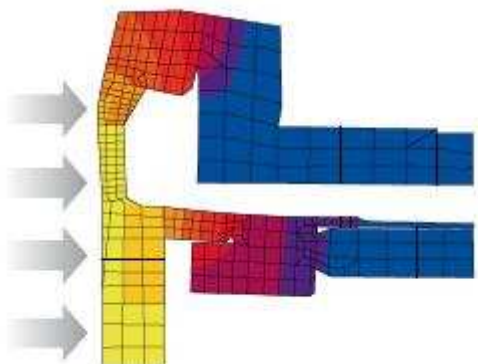
### 3.3 Chlazení snímačů

Jak již bylo uvedeno, existují dva způsoby chlazení snímačů, a tedy použitím snímače s integrovanými chladícími kanálky, a nebo vložením nechlazeného snímače do chladicího adaptéru.

Tepelný šok je chyba při měření nastávající s každým pracovním cyklem. To je způsobeno časově závislým teplotním namáháním membrány snímače vyvolaném toku tepla horkých spalin, který může dosáhnout teploty přesahující 2 000 °C po dobu několika milisekund.

Deformace membrány vytváří iluzi změny tlaku. Stupeň zkreslení výsledků měření závisí na snímači. Rozsah tepelného šoku se měří ve srovnání s vodou chlazeným referenčním snímačem tlaku. Tepelnému šoku odpovídá maximální

odchylka mezi zkoušenou jednotkou a referenčním snímačem. Hodnoty se vztahují k měření na testovacím motoru při otáčkách 1 500 1/min a při středním efektivním tlaku 0,9 MPa ( 9 bar).



***Obr. 3 FEM Simulace ukazující rozsah deformace membrány (vlevo) vlivem tepelného toku [ $^{\circ}\text{C}$ ]***

K zajištění vysoké kvality měření tlaku v sacím nebo výfukovém potrubí musí být brány v potaz tyto požadavky:

- Připojení snímače kolmo na směr toku měřeného média
- Vyvarovat se dutin mezi snímačem a měřeným úsekem

### **3.3.1 Chlazení ve výfukovém potrubí**

Chladicí systém zajišťuje dodávku chladicí kapaliny konstantním tlakem chlazeným snímačům a adaptéřům (prevence proti kolísání tlaku či signálu). Vzhledem k přímému vodnímu chlazení membrány a měřicího elementu je dosaženo:

- zvýšení přesnosti měření a životnosti snímače
- prevence proti přehřátí křemenných výbrusů
- redukce šoků vlivem teploty a změnou zatížení
- minimální změna citlivosti díky téměř konstantní teplotě křemenných výbrusů



## 4 Snímače tlaku

V zásadě existují dva typy snímačů tlaku, a to snímače měřící absolutní a relativní tlak. Absolutní tlak je vztažen k vakuu, zatímco relativní tlak je vztažen k atmosférickému nebo jinému tlaku.

Každý systém pro měření tlaků se skládá z těchto hlavních složek, jimiž jsou snímač, spojovací kabely, zesilovač signálu a indikátor. Volba použití piezoelektrického či piezorezistivního snímače tedy na tomto nezávisí.

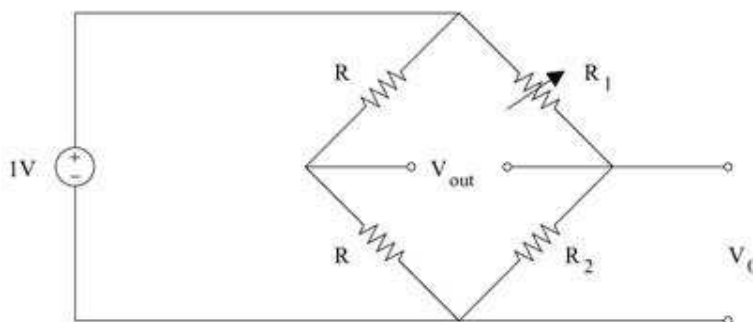
### 4.1 Snímače absolutního tlaku – Piezorezistivní snímače

Výhodami měření absolutního tlaku jsou vysoká přesnost (včetně dynamiky) a schopnost řešení tlakových rozdílů mezi jednotlivými válci a pracovními cykly. Snímání dynamického chování a přesného tlaku je zároveň rozhodující pro výpočet. S novými miniaturizovanými piezorezistivními snímači tlaku je velmi snadná instalace.

#### 4.1.1 Fyzikální základ piezorezistivního měření tlaku

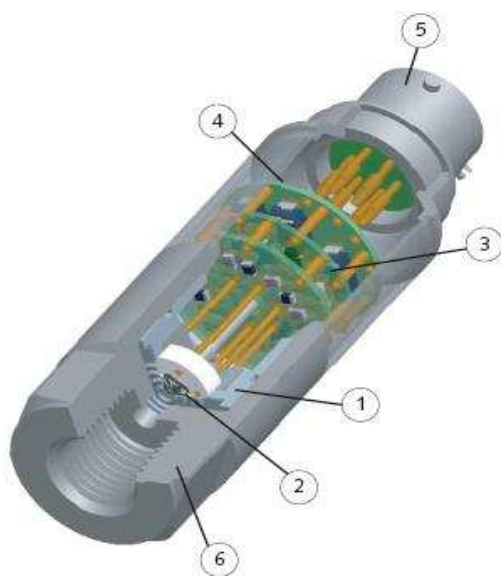
Při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů nebo polovodičů ke změnám geometrických rozměrů a ke změnám krystalografické orientace, které vedou ke změně odporu. Pružnými deformacemi rozumíme takové síly, které působí v mezích platnosti *Hookova zákona* a jsou zpravidla vyvolány tlakem nebo tahem. Termín piezorezistivní tedy znamená, že se tlak mění na elektrický odpor. Tyto senzory pracují na základě využívání tohoto jevu, kdy je krystal vystaven mechanickému namáhání.

Piezorezistory převádějí mechanické napětí na změny odporu. Změna odporu může být snadno měřena změnou úbytku elektrického napětí. Tak je měřený tlak ve výsledku převeden na elektrický napěťový signál. Jako převodník změny odporu na napětí se využívá známého Wheatstonova můstku.



**Obr. 4 Zapojení snímacího piezorezistoru ( $R_1$ ) do Wheatstonova můstku – napětí na výstupu  $V_0$  je přímo úměrné měřenému tlaku  $[P^{-1}]$**

Technologie integrovaných obvodů umožňuje zapojit velmi malý řetězec odporů a aktivních prvků na křemíkový plátek, který může být konstruován také jako tlaková membrána. Hlavními výhodami této technologie je vysoká citlivost, kompaktnost a vysoká vlastní frekvence. Dnešní piezorezistivní snímače mají rezistory zasazené na povrch křemíkového pásu. Ten je poté zezadu leptán. To znamená, že střední část se stává membránou a hrany montážní plochou. Křemíkový pásek je poté přilepen k plátku skla, který má referenční otvor pro měření relativního tlaku, kdežto pro měření absolutního tlaku je zapotřebí vakua, které je vytvořeno mezi plátkem skla a křemíku během lepení. Tato konstrukce zaručuje teplotní stabilitu a minimalizuje hysterezi.



1. Pouzdro chirurgická ocel 316 L
2. Snímací element: křemíková destička s implantovaným měřícím řetězcem
3. Elektronika zcela zapouzdřená elektronika proti vysokým vibracím a rázům prostředí
4. Ochrana: ochranný obvod proti zkratu, obrácené polaritě a přepětí
5. Elektrický konektor
6. Tlakový konektor

**Obr. 5 Stavba piezorezistivního snímače  $[P]$**

Systém měření tlaku s piezorezistivními snímači obvykle obsahuje snímač, připojovací kabely a zesilovač signálu. Indikátor nebo analytická zařízení obvykle obsahují osciloskop či jednotku získávání dat PLC. Měřicí členy jsou velmi citlivé a ideální pro nízké a střední tlaky. Pro vysoké tlaky jsou vhodné snímače s tužším křemíkovým páskem. Keramické měřicí členy jsou vhodné pro aplikace vyžadující méně nákladové technologie a nižší měřicí přesnost.

#### **4.1.2 Statické a dynamické vlastnosti**

Piezorezistivní měřicí prvky vyrobené z křemíku mají výborné vlastnosti statických měření. Křemík je jednoduchý krystal a zůstává elastický až do jeho zlomení. Z tohoto důvodu jsou křemíkové členy velmi stabilní a jejich vlastnosti se nemění dokonce i po dlouhou dobu. Jejich dynamické vlastnosti jsou také výborné. Vlastní frekvence křemíkových pásků je díky jejich malému rozměru velmi vysoká, dle tlakového rozpětí mezi 15 a 200 kHz.

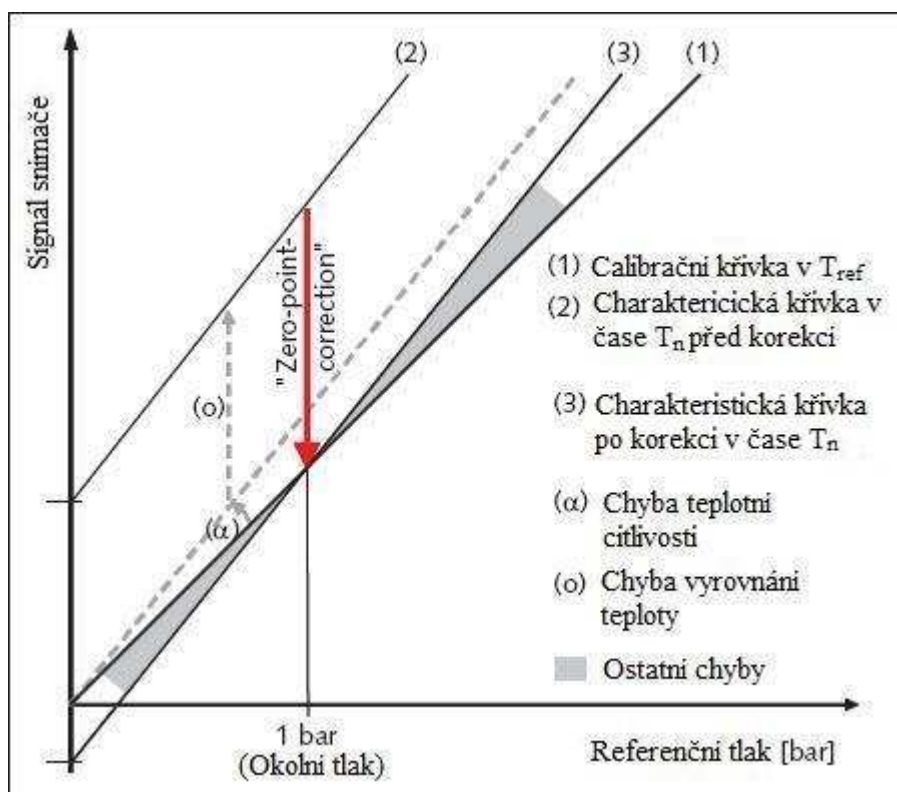
#### **4.1.3 Úprava signálu**

K úpravě signálu slouží široká škála zesilovačů. Od jedno-kanálových zesilovačů signálu, až po kompletní systém zabudovaný přímo uvnitř snímače. Měřicí signál, který je produkován snímačem, je napětím na výstupu z odporů Wheatstonova můstku. Signál ze snímače je převáděn na napěťový přímo uvnitř snímače a přenáší je dále k indikátoru. Zde jsou zvláštní požadavky na vhodný zdroj napájení. Napěťový zesilovač používaný pro úpravu signálu také udržuje konstantní proud a nízké napájecí napětí snímače. Pro vyrovnaní chyb při měření způsobených teplotou jsou některé tyto zesilovače vybaveny tzv. digitální kompenzací. Za tímto účelem snímač měří při různých teplotách a tlacích. Výsledná chybová matice je aproximována a zaznamenána v zesilovači. Toto umožňuje nepřetržitě okamžité opravy pro další zlepšení celkové přesnosti. Odporů Wheatstonova můstku mohou být současně použity pro stanovení teploty měřicího prvku. Proto některé

piezorezistivní zesilovače nabízejí možnost dalšího teplotního výstupu, který může být využit k měření teploty média.

#### 4.1.4 Korekce na nulový bod:

Měřicí element piezorezistivních snímačů je křemíková destička, ve které jsou implantovány rezistory. Vlastnosti rezistorů mohou být ovlivňovány teplotou. Vliv teploty je určen během výroby a kompenzován použitím vhodných rezistorů (analogová kompenzace) nebo digitálně upraven. Zbývající chyby mohou být sníženy provedením korekce snímaného signálu na nulový bod.



**Obr. 6 Schématické znázornění korekce na nulový bod (Zero-point correction) [1]**

Kalibrační křivka (1) zobrazuje ideální charakteristiku snímače, a proto je každá odchylka od této křivky popisována jako chyba snímače. Vystavení snímače libovolné teplotě  $T_n$  způsobuje chybu nulového bodu a citlivosti, které generují křivku (2). Tyto chyby mohou být v čase měření opraveny korekcí nulového bodu na

teplotu  $T_n$  a okolní tlak. Po provedení této korekce a za předpokladu stálosti teploty je zbývající nepřesnost způsobena pouze chybou citlivosti.

#### **4.1.5 Hlavní výhody piezorezistivních snímačů s křemíkovým plátkem:**

- dlouhá životnost
- vynikající stabilita
- vysoká reprodukovatelnost měření
- odolnost proti nárazu a vibracím
- vysoký napěťový výstup a vlastní frekvence

### **4.2 Snímače změny tlaku – Piezoelektrické snímače**

Piezoelektrické snímače tlaku měří pouze změnu tlaku v čase. Proto nejsou vhodné pro měření statických tlaků. Mezi hlavní výhodu patří velmi krátká doba odezvy. I piezoelektrické snímače se vyrábějí v miniaturizovaných provedeních pro usnadnění instalace.

#### **4.2.1 Fyzikální základ piezoelektrického měření tlaku**

Ke konstrukci tohoto typu snímače se využívá piezoelektrického jevu, který spočívá v tom, že uvnitř některých polykrystalických dielektrik vzniká vlivem mechanické deformace elektrická polarizace, čímž se na povrchu tvoří zdánlivé náboje, které mohou na přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat náboje skutečné. Jakmile napětí zmizí, dostává se dielektrikum do původního stavu. Tyto snímače jsou mimořádně stabilní, robustní a kompaktní. Díky těmto vlastnostem je jejich využití rozšířeno do oblastí vývoje a výzkumu, výroby a testování.

Základní požadavky kladené na trasdukční prvky jsou velká piezoelektrická citlivost, mechanická pevnost a permitivita. Používají se buď samotné piezoelektrické krystaly, a nebo piezoelektrická keramika. Existuje široké spektrum materiálů, ale

pouze část získala užití v praxi. Nejčastěji používaným materiálem je křemen, a to jako samostatný krystal. Turmalín je vhodný pro senzory používané ve vysokých teplotách a také k měření vibrací. Nově se používají i krystaly ortofosforečnanu galia, zvláště pro více teplotně namáhané senzory měření tlaku.

V měřící technice se nejvíce využívá právě krystalu křemene ( $\text{SiO}_2$ ) jako měřícího elementu. V podstatě se skládá z tenkých plátek nebo destiček křemene vyříznutých z krystalu podél vhodné osy. Křemen krystalizuje v šesterečné soustavě, přičemž elementárním prvkem je šestiboký hranol. Má tři základní osy, jež jsou z hlediska vzniku piezoelektrického jevu velmi důležité. Podélná osa  $z$  se nazývá optická, osy  $x$  protínající hrany kolmo na optickou osu jsou elektrické a osy  $y$ , které jsou kolmé k osám  $x$  a ose  $z$  označujeme jako mechanické nebo neutrální. Vyřízneme-li z krystalu  $\text{SiO}_2$  destičku tak, aby její hrany byly rovnoběžné s jednotlivými osami, pak vlivem sil působících kolmo na optickou osu hranolu se krystal zelektrizuje, přičemž vektor polarizace  $P$  bude směřovat podél elektrické osy. Na plochách kolmých na elektrickou osu se objeví náboje. Působením síly  $F_z$  rovnoběžně s optickou osou se krystal nezelektrizuje. Obecná teorie piezoelektrického jevu předpokládá, že existují lineární vztahy mezi složkami vektoru elektrické polarizace a složkami tenzoru mechanické deformace. Omezíme se na případy, kdy síly působí na křemen ve směru osy  $x$  (elektrická osa) a osy  $y$  (mechanická osa).

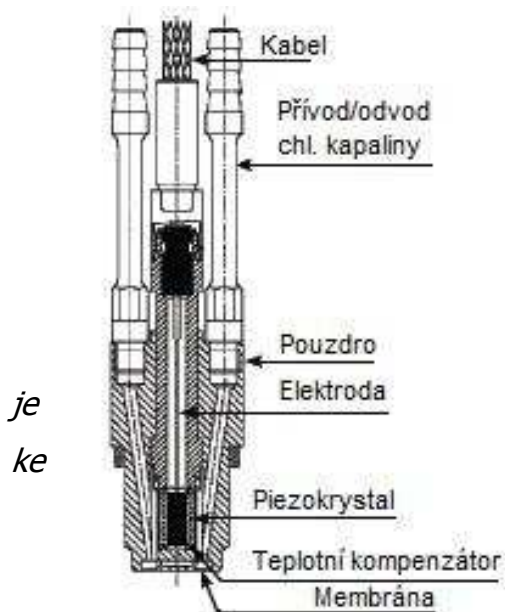
Piezoelektrické měřící systémy jsou aktivní elektrické systémy, tj., že krystal produkuje elektrický náboj pouze pokud zaznamená změnu zatížení. Z tohoto důvodu nemohou fungovat při měření statických tlaků. Avšak existuje mylná představa, že piezoelektrické přístroje jsou vhodné pouze pro dynamická měření. Křemenové snímače spojené s vhodným modifikátorem signálu nabízejí vynikající kvazi-statické měřící schopnosti. Existuje mnoho aplikací těchto snímačů při přesném a spolehlivém měření kvazi-statických jevů po několik minut či dokonce hodin. Tyto snímače se aplikují tam, kde je vyžadována přesné měření a záznam dynamických změn mechanických veličin jako jsou tlak, síla a akcelerace.

Tlakové snímače jsou konstruovány tak, aby minimalizovaly nebo zcela odstranily vibrace. Křemenné prvky jsou sestavovány jednotlivě nebo do vrstev a

obvykle předepjaty pružinou. Každý snímač je upořádan, optimalizován a nakonec kalibrován pro jeho konkrétní aplikaci (pro měření síly, tlaku či akcelerace).

Křemenové snímače vykazují pozoruhodné vlastnosti, které odůvodňují jejich rozsáhlé využití v oblasti výzkumu, vývoje, výroby a testování. Jsou velmi stabilní, robustní a kompaktní. Z velkého množství piezoelektrických materiálů, které jsou v dnešní době k dispozici, je přednostně volen křemen, a to z důvodů těchto jeho vynikajících vlastností:

- vysoká přípustná hodnota tlaku asi  $150 \text{ N/mm}^2$
- odolává teplotám do  $500 \text{ }^\circ\text{C}$
- vysoká tuhost, linearita a zanedbatelná hystereze
- téměř konstantní citlivost ve celém teplotním rozsahu
- velmi vysoký izolační odpor ( $10^{14} \text{ } \Omega$ ) umožňující měření při nízkých frekvencích ( $<1 \text{ Hz}$ )



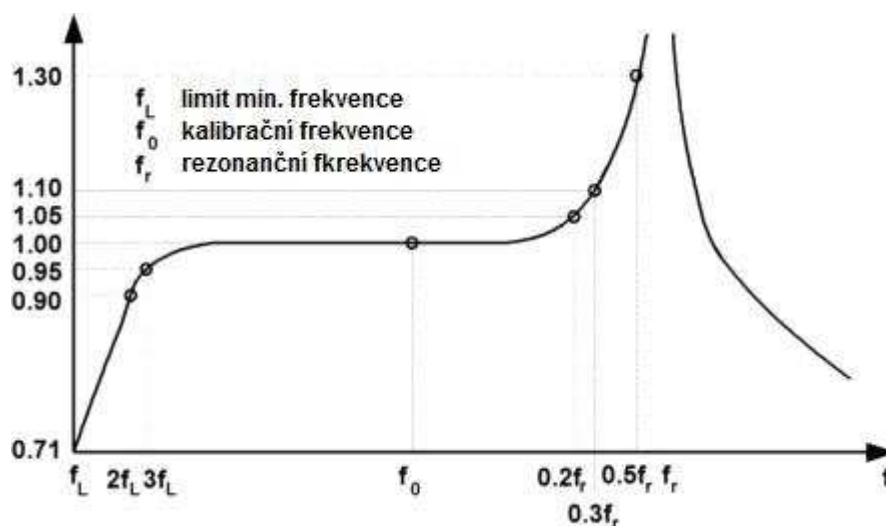
*Snímač je tvořen několika křemenovými destičkami předepjatými pružinou. Pouzdro snímače je chlazeno kapalinou protékající potrubím a kanálky, takže vnitřní prostory snímače s piezoelektrickými destičkami nejsou vystaveny vysokým teplotám. Vstup snímače proveden stíněným kabelem, který je připojen konektoru.*

**Obr. 7 Chlazený piezoelektrický snímač [1]**

#### 4.2.2 Dynamická charakteristika snímače

Piezoelektrický tlakový snímač může být považován za mechanickou dolnofrekvenční propust s rezonanční špičkou. Piezokrystal (včetně dalších pružných

komponent) formuje pružnou hmotu systému, který se tak chová jako pružina s vlastní frekvencí a tak definuje horní frekvenční limit snímače. Aby bylo dosaženo širšího provozního frekvenčního rozsahu, měla by být rezonanční frekvence pružné hmoty co nejvyšší.



**Obr. 8** Typická závislost piezoelektrických snímačů a závislost citlivosti na frekvenci snímače [ $f^{-1}$ ]

Na frekvenční křivce lze pozorovat několik užitečných rozsahů. Na zhruba pětině rezonanční frekvence je odezva senzoru 1.05. To znamená, že měřicí chyba v porovnání s nižšími frekvencemi je 5%. Na zhruba 1/3 rozsahu je chyba 10 %. Z tohoto důvodu lze frekvenční rozsah považovat za lineární právě do 1/3 hodnoty rezonanční frekvence. Spodní frekvenční limit hlavně závisí na zvoleném předzesilovači a může být často donastaven. Pro napěťové zesilovače je spodní frekvenční limit funkcí RC časové konstantě formované snímačem, kabelem a vstupní kapacitou zesilovače dohromady se vstupním odporem zesilovače  $R_{in}$ .

#### 4.2.3 Výstup – náboj a napětí

V nabídce snímačů jsou jednak ty, které mají výstup signálu v podobě náboje (v jednotkách piko Coulomb [pC]) a ty, které mají tento výstup v podobě napětí (v jednotkách milivolt [mV]). Měření náboje piezokrystalu probíhá buď přímo pomocí externí elektroniky s vysokou vstupní impedancí, a nebo častěji vnitřní elektronika konvertuje náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí.



Piezoelektrický element je připojen na výstupní elektrické rozhraní přes pár elektrod. Vlastnosti výstupního signálu jsou obvykle dány vnitřními integrovanými elektrickými obvody ICP (Integrated Circuit - Piezoelectric), které přeměňují vysokoimpedanční signál v podobě náboje  $Q$  na nízkoimpedanční napěťový signál  $U$ .

Existují dva typy piezoelektrických snímačů. Jednak to jsou snímače s nábojovým výstupem, tj. v jednotkách  $pC$ /mechanickou jednotku, které vyžadují zesilovač pro zpracování a transformaci signálu z piezoelektrického snímače na napěťový signál, který lze již měřit běžnými metodami a měřidly. Obvykle jsou tyto systémy více všestranné. Časová konstanta, zesílení, normalizace a nulování jsou ovládány přes externí zesilovač náboje. Kromě toho je časová konstanta obvykle delší. Protože neobsahují žádnou zabudovanou elektroniku, mají tyto snímače širší rozsah provozní teploty.

Druhým typem jsou piezoelektrické snímače s napěťovým výstupem, které obsahují již zabudovaný miniaturní převodník náboje na napětí. Tyto snímače vyžadují externí zdroj napájení pro elektroniku uvnitř snímače. To je zajištěno pomocí koaxiálního dvou vodičového kabelu a elektronické jednotky, která dodává konstantní budící proud pro lineární provoz v širokém rozsahu napětí a také odděluje přepětí na výstupu. Dalším způsobem napájení je možnost použití duálního zesilovače náboje (tj. zesilovače pro snímače jak s napěťovým, tak i nábojovým výstupem).

Obecně platí, že tyto systémy jsou uzpůsobeny pro konkrétní aplikaci. Vzhledem k tomu, že tyto snímače mají vnitřně stanoven rozsah a časovou konstantu, může dojít k omezení jejich zamýšleného použití. Nicméně pro aplikace s vhodně zvoleným frekvenčním a teplotním rozsahem nabízet nižší cenu. Dále mohou tyto snímače pracovat s obecnými (univerzálními) kabely ve vlhkém prostředí.

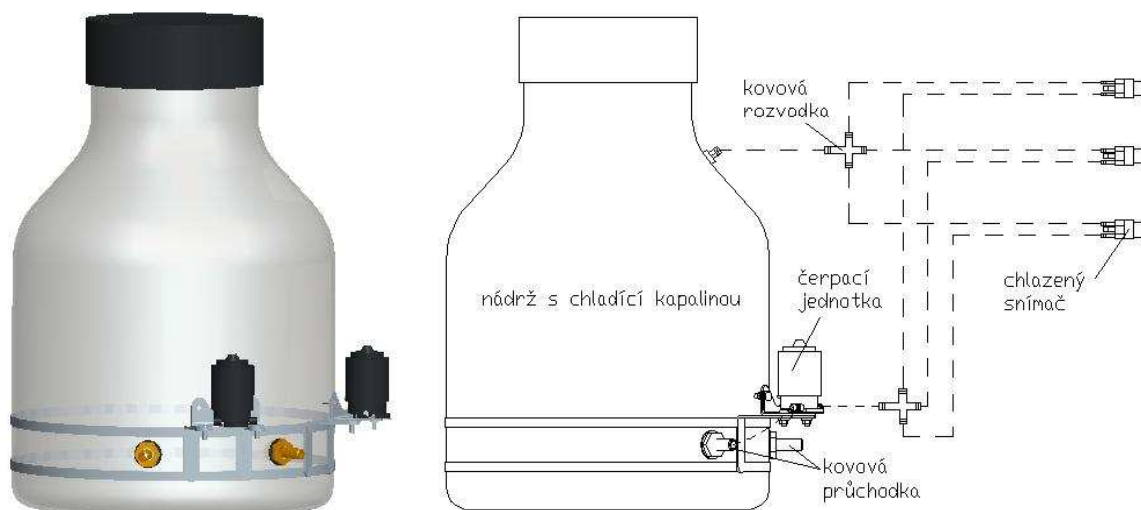
Oba systémy používají stejný typ piezoelektrického elementu či elementů. Jejich časové konstanty určují použitelný frekvenční rozsah.

Znamé konstrukce chlazených snímačů a chladících adaptérů výrobců KISTLER a AVL jsou uvedeny v **Příloze 1 - 6**.

## 5 Konstrukční uspořádání vodního chlazení

Chladicí zařízení má za úkol zajistit dodávku chladicí kapaliny pro chlazené nízkotlaké snímače. Vzhledem k přímému vodnímu chlazení membrány a měřících elementů je dosaženo zvýšení přesnosti měření a trvanlivosti snímačů.

Toto uspořádání bylo navrženo tak, aby bylo možné připojit 1 až 3 piezoelektrické nebo piezorezistivní chlazené snímače tlaku či chladicí adaptéry, dále kompaktní a jednoduché na ovládání.



**Obr. 9 3D návrh a schématické uspořádání chladicího systému**

### 5.1 Popis jednotlivých částí systému

#### 5.1.1 Nádrž s destilovanou vodou

Jako chladicího média je využita destilovaná voda. Nádrž tvoří plastový barel o celkovém objemu 20 l. Součástí nádrže jsou dvě hliníkové objímky pro přichycení čerpacích jednotek pomocí hliníkových držáků (úhelníků) dle konstrukčního návrhu. V nádobě jsou vyvrtány dva otvory o průměru 20 mm, kterými vytéká chladicí kapalina do čerpací jednotky. Do těchto otvorů jsou našroubovány kovové průchodky.

### 5.1.2 Čerpací jednotka APO 040

Jako čerpadla chladící kapaliny je zde využito malého a kompaktního motorku ostřikovačů pro osobní automobil Škoda 120. Tento motorek zajišťuje konstantní dodávku chladící kapaliny. Čerpací jednotka se skládá ze stejnosměrného motorku a zubového čerpadla. Pro připojení k elektrice slouží dva kolíkové kontakty 6,3 mm. Polarita je označena na víku motorku.

Tato čerpací jednotka je dle pokynů výrobce namontována ve svislé poloze. Při její provozu je povolen pouze mírný odklon od svislé polohy směrem patkou dolů.

Pro umožnění dlouhodobějšího chodu čerpací jednoty, bylo nutné snížit napájecí napětí. Toho se dosáhlo sériovým zapojením stejného typu čerpací jednotky. Díky tomu se snížilo napájecí napájení pro jednotlivé jednotky z celkových 12 V na 6 V. Díky tomu čerpadla snesou dlouhodobější zatížení při čerpacím výkonu, který by dávala jedna čerpací jednotka při chodu na plné zatížení.

**Tabulka T1** – Technické parametry čerpací jednotky APO 040

Jmenovité napětí	12 Vss
Jmenovitý proud	3 A
Výkon čerpadla	min. $15 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ při tlaku 100 kPa
Doba zatížení	max. 20 s
Druh čerpané kapaliny	voda nebo směs alkoholu, popř. směs vody a jiných vhodných přísad

### 5.1.3 Napájení

Jelikož je motorek ostřikovačů součástí osobního automobilu, jako zdroj napájení může být použita jakákoliv autobaterie či baterie do motocyklu s napájecím napětím 12 V.

Baterii a motorek spojuje dvou vodičový kabel, na jehož konci jsou přiděleny dvě krokosvorky pro přichycení k baterii. Spouštění a vypínání motorku je zajištěno přes mezi-kabelový vypínač. Celková délka napájecího kabelu je 2 m.

### 5.1.4 Rozvod chladící kapaliny

Rozvod chladící kapaliny je zrealizován pomocí hadiček různých velikostí a materiálů, rozvodek, kovových kohoutů a průchodek.

Hadičky jsou dvojího druhu, jednak z materiálu Viton o rozměru 2/3 mm, který odolává vysokým teplotám až 200 °C, a dále ze silikonu o rozměru 4/3 mm pro méně teplotně namáhaná spojení.

K rozvedené čerpané kapaliny je využit kovový třicestný kohout, který má nezávisle uzavíratelné výstupy (vstupy).



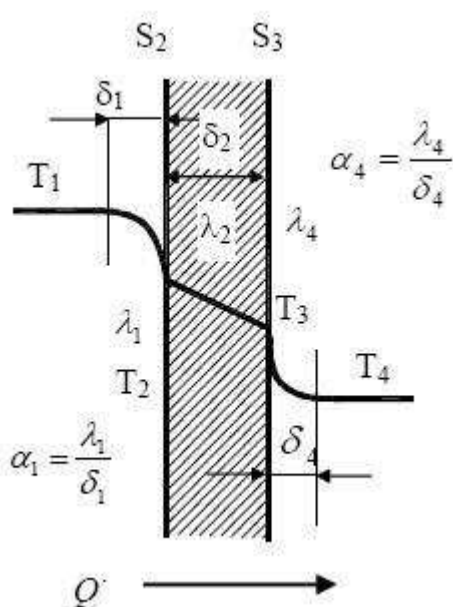
***Obr. 10 kovový kohout***

## 6 Výpočet tepelného namáhání snímačů

Pro PC simulaci tepelného zatížení byly vybrány dvě odlišné provedení od výrobce AVL, a to jednak chlazeného snímače větších rozměrů QC43D, a naopak chladicího adaptéru AE 02 pro miniaturní piezoelektrický snímač GU21C.

### 6.1 Základy technické termodynamiky pro PSM (dle skript [5])

V tepelně-technických zařízeních je velmi častým tepelným dějem sdílení tepla. V automobilových motorech jde především o přestupy tepla uvnitř válce motoru, přestupy tepla v chladicí soustavě motoru, vedení tepla materiálem a pod. Na **Obr. 11** jsou znázorněny toky tepla ve schématu, který ukazuje mechanismus



sdílení tepla z plynu přes stěnu do chladicího systému (voda, příp. vzduch).

Teplo přechází (prostupuje) vždy z místa o vyšší teplotě ( $T_1$ ) do místa s nižší teplotou ( $T_4$ ). V naznačeném případě se u stěny  $S_2$  s teplotou  $T_2$  vytvoří vrstva plynu  $\delta_1$ , ve které klesá teplota z  $T_1$  na  $T_2$  a teplo přestupuje z plynu do stěny: tepelný výkon přestupu (konvekce)  $Q$  ve [W] do stěny určuje Newtonův zákon:

$$Q = \alpha_1 \cdot S_2 \cdot (T_1 - T_2)$$

**Obr. 11 Prostup tepla stěnou [5]**

$\alpha_1$  ... součinitel přestupu tepla [W/m<sup>2</sup>K]

Materiálem stěny je teplo vedeno ke stěně  $S_3$  s nižší teplotou ( $T_3$ ): tepelný výkon vedení tepla (kondukcí) stěnou síly  $\delta_2$  určuje Fourierův zákon:

$$Q = \lambda_2 \cdot S_{2(3)} \cdot \frac{T_2 - T_3}{\delta_2}$$

$\lambda_2$  ... součinitel vedení tepla ve stěně (součinitel tepelné vodivosti materiálu stěny) [W/mK]

Ze stěny  $S_3$  přestupuje tepelný výkon  $Q$  do prostředí (např. vody nebo vzduchu chladicího systému) s teplotou  $T_4$ :

$$Q = \alpha_4 \cdot S_3 \cdot (T_3 - T_4)$$

Součinitelé přestupu tepla  $\alpha_1$  a  $\alpha_4$  v prostředí na jednotlivých stranách stěny závisí na součinitelích vedení tepla  $\lambda_1$  a  $\lambda_4$  v prostředí na obou stranách stěny: jejich velikost je silně ovlivněna stavem v prostředí (klid, turbulence, ...).

Vedle sdílení tepla přestupem a vedením se na některých dílech motoru projevuje i sdílení tepla sáláním - ve většině případů jde o vyzařování tepla ze sálavé stěny o ploše  $S_s$  vysokou teplotou  $T_s$  (např. z výfukového potrubí motoru) do okolí s teplotou  $T_0$ . Velikost tepelného výkonu sáláním určuje Stefan-Boltzmannův zákon:

$$Q = C_s \cdot S_s \cdot \left( \frac{T_s}{100} \right)^4$$

$C_s$ ... součinitel sálání (sálavosti) tělesa (zjistí se z tabulek) [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]

(pro zkorodovaný povrch oceli-litiny je hodnota  $C_s \cong 4,5$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)

U vozidlových motorů často dochází ke sdílení tepla do okolí současným působením přestupu i sálání (např. v motorovém prostoru): pro takový případ se tepelný výkon předaného tepla do okolí určuje vztahem:

$$Q = (\alpha_p + \alpha_s) \cdot S_s \cdot (T_s - T_0)$$

$\alpha_p$  ... součinitel přestupu tepla [W/m<sup>2</sup>.K]

$\alpha_s$  ... přepočtený součinitel sálání  $\alpha_s = \beta \cdot C_s$  [W/m<sup>2</sup>.K]

$\beta$  ... teplotní součinitel sálání  $\beta = \frac{\left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4}{T_s - T_0}$  [K<sup>3</sup>]

$T_s$ .. teplota stěny [K]

$T_0$ .. teplota okolí [K]

## 6.2 Software ProENGINEER Wildfire 4.0

Dnešní možnosti výpočetní techniky (SW i HW) poskytují téměř detailní pohled na rozložení teplot, teplotních deformací i napjatosti v teplotně zatížených dílech pístového motoru. Správnost takových řešení je přitom závislá na vstupních údajích o zdroji teplotního zatížení a na popisu okrajových podmínek i pochopení významných souvislostí daných strukturálním a konstrukčním uspořádáním.

Metody sítí (konečných diferencí) a konečných prvků vycházejí z rozdělení zkoumané plochy tělesa na elementy. Tyto metody zkoumají vnitřní stavy tělesa a dále vztah k sousedícím elementům. Volbou počtu elementů lze získat soubor číselných hodnot více či méně dokonale nahrazující spojitou křivku vyplývající z matematického řešení. V podstatě se jedná o modelové znázornění a řešení umožněné dnešní výpočetní technikou.

Pro vytvoření 3D modelů chlazeného snímače a chladicího adaptéru bylo využito SW ProENGINEER. PC simulace tepelného namáhání modelů byla provedena v prostředí ProMECHANICA v tomtéž SW.

ProENGINEER Mechanica je multi-disciplinární CAE (Computer Aided Engineering) nástroj, který umožňuje simulovat chování fyzického modelu, porozumění a zlepšení mechanických vlastností návrhu. Zde je možno přímo počítat namáhání, deformace, frekvence, přenos tepla a další faktory, které ukáží, jak se model bude chovat ve zkušebním nebo reálném provozu.

ProENGINEER Mechanica nabízí produktovou řadu dvou modulů, z nichž každá řeší různé skupiny mechanického chování. Jsou jimi:

- Structure – strukturální integrita modelu
- Thermal – hodnotí přestup a vedení tepla

Mechanica Thermal poskytuje vhodný nástroj pro simulaci chování dílů a sestav podléhajícím tepelnému namáhání. Thermal se opírá o adaptivní technologii řešení, která umožňuje rychlé a přesné řešení. Dále nabízí integrovaný režim speciálních analýz, které automaticky vyváří plně asociativní FEM síť pro řešení metodou konečných prvků.

Modul Thermal umožňuje:

- Vytvořit reálné prostředí za použití tepelné zátěže, předepsané teploty a přenosových podmínek pro geometrický model
- Studii návrhu tepelného namáhání v jednom bodě v čase nebo změny chování prostřednictvím stanovených intervalů
- Použití SW Mechanica pro řešení FEM nebo ANSYS pomocí metody konečných prvků
- Vybrat jeden nebo více parametrů a poté graficky přezkoumat výsledky jako funkce, která je dána změnou parametru

V modulu Thermal lze definovat dva typy analýz:

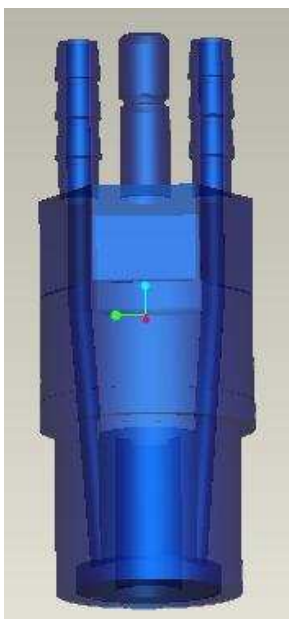
- Steady Thermal (stálá teplota) – vypočítá tepelnou reakci dle okrajových podmínek, které se skládají z předepsané teploty nebo podmínek přestupu tepla
- Trensient Thermal (přechodová teplota) – vypočítá teploty a tepelný tok v modelu v různých časech jako reakci na tepelnou zátěž (musí se zadat alespoň jedna okrajová podmínka a jedna mechanická zátěž)

### **6.3 Výpočetní model v software ProENGINEER**

Model měřící soustavy se skládá z části výfukového potrubí, zástavby chlazeného piezoelektrického snímače pro indikaci tlaku AVL typ QC43D – M14x1,25 a zástavby chladicího adaptéru AVL AE 02 M14x1,25, které byly poskytnuty Laboratoří PSM TUL v Liberci (viz. **Příloha 3** a **Příloha 4**).



### 6.3.1 3D modely pro simulaci



**Obr. 12 3D model snímače AVL QC43D**



**Obr. 13 3D model chladicího adaptéru AVL AE 02**

QC43D Chlazený piezoelektrický snímač je vhodný pro měření na spalovacích motorech s válci o průměru větším než 100 mm. Tyto snímače splňují nejvyšší požadavky pro hodnocení termodynamických vlastností spalovacích motorů.

AE 02 Tlumící adaptér se závitem M14 x 1,25 je doporučeno použít spolu se snímačem GU21C pro měření tlaku plynu v sacím nebo výfukovém potrubí. Dále je tento adaptér opatřen přívodem na chladicí kapalinu a tlumícími prvky, které zabraňují rušení signálu vlivem teploty a vibrací. Jeho umístění je zvláště vhodné pro nízkotlaká měření ve výfukovém potrubí nebo na jiném měřeném místě, které má vysokou teplotu. Tento adaptér má také zvláštní připojení pro měření absolutního tlaku pro nastavení nulového bodu tlakového signálu.

Snímač QC43D je sestaven z několika dílů různých materiálů. Jako základní a měřicí prvek je zde křemen v několika vrstvách výbrusů, které jsou obklopeny izolačním materiálem. Nejčastěji jím je PTFE – Teflon, který se používá pro teploty nepřesahující 250 °C nebo Kapton, který je odolný až do 300 °C. Nezbytnou podmínkou linearity a vysoké vlastní frekvence je právě mechanické předpětí, proto

jsou měřicí elementy předepínány, a to nečastěji vysokopevnostní ocelí nebo speciální slitiny berylia a bronzu. Toto vše je uloženo v ocelovém pouzdře, které slouží jako ochrana proti nečistotám a vlhkosti a také jako štít proti ovlivnění měření elektrický polem. Vše musí být vodotěsné, vzduchotěsné a hermeticky uzavřené, proto jsou všechny tyto části k sobě svařovány.

Chladicí adaptér AE 02 je vyroben pouze z jednoho materiálu, a to z oceli.

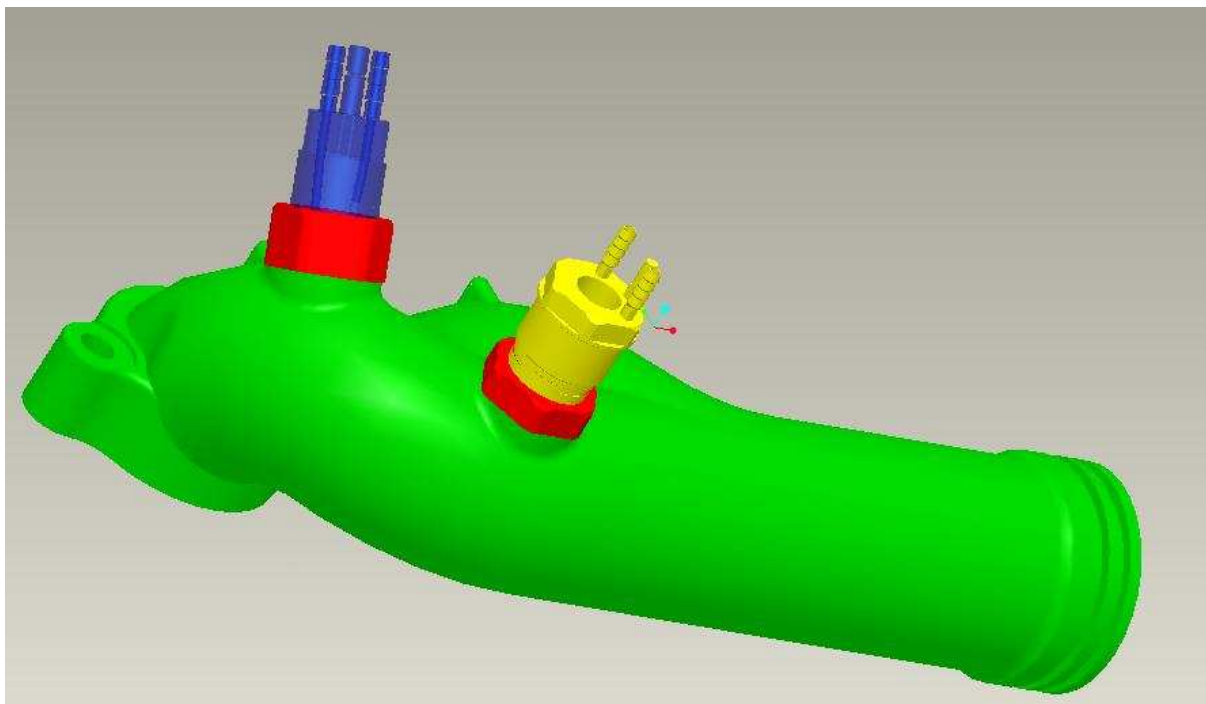
*Pozn.: Přesné druhy materiálů nebyly výrobcem dodány, proto je výpočet zjednodušen a jsou použity materiály z knihovny SW ProMECHANICA.*

**Tabulka T2** Vlastnosti oceli dle [ <sup>8</sup> ]

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	7,827
Měrná tepelná kapacita [J/kgK]	469
Tepelná vodivost [W/mK]	43
Poissonova konstanta	0,27
Yongův modul pružnosti [MPa]	199948

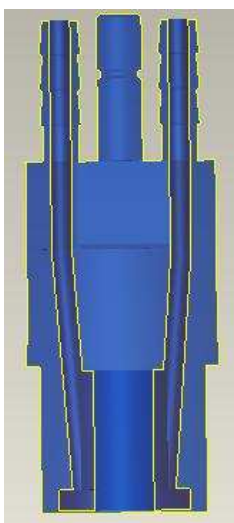
Shrnutí vlastností snímačů tohoto výrobce:

- efektivní analýza díky vysoké přesnosti měření
- vysoká přesnost měření díky vyrovnávací membráně proti teplotním šokům
- široká škála příslušenství optimálně navržena pro použití se snímači
- jednoduchá instalace a odejmutí použitím adaptéru pro výměnné snímače
- snadný servis díky výměnným kabelům, chladících adaptérů systémů
- rozsah měření až do 25 MPa (250 bar)

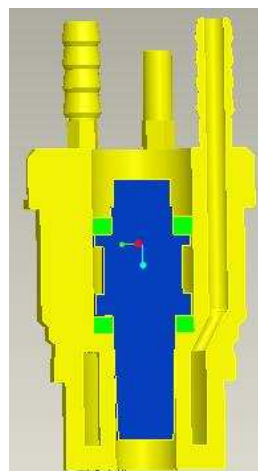


**Obr. 14 3D model pro výpočet tepelného namáhání [<sup>1</sup>]**

Chlazení snímačů se používá pro ochranu měřících elementů a funkčnosti snímače samotného. Proto nás při PC simulaci nejvíce zajímá oblast měřících elementů. Chladicí kanálky jsou navrženy tak, aby voda ochlazovala právě tuto oblast. PC simulaci chladicího adaptéru je bez zabudovaného nechlazeného snímače, protože zde bude posuzována teplota vnitřní stykové plochy adaptéru se snímačem.



**Obr. 15 Řez snímačem QC43D**



**Obr. 16 Řez chl. adaptérem AE 02 se snímačem GU21C**

## 6.4 Rozbor tepelného zatížení

Snímače jsou tepelně namáhány výfukovými plyny, které v závislosti na provozním režimu a na umístění snímačů mohou dosahovat teplot až 1000 °C.

Určujícími parametry pro přestup tepla mezi výfukovými plyny a stěnami jsou teplota výfukových plynů  $T_{vp}$  a součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , množství tepla, které do stěn přestoupí je potom dále určeno velikostí teplosměnné plochy  $S$  a teplotou stěny  $T_s$ . Povrchová teplota dílů, do kterých teplo přestupuje z prostředí s proměnlivou teplotou. Teplota  $T_s$  je rovněž proměnlivá. Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  závisí na řadě parametrů, především ale na stavu náplně válce (mechanismus přestupu tepla z hlediska kinetické teorie plynů, vliv tlaku, teploty a rychlosti proudění v blízkosti teplosměnné plochy).

### 6.4.1 Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  závisí na druhu proudění a stavu tekutiny a také na tvaru stěny. Proto je velmi obtížné určit velikost  $\alpha$  výpočtem. Velikost  $\alpha$  značně kolísá. Přibližné rozmezí hodnot  $\alpha$  pro různé látky je v uvedeno v **Tabulce T3**. Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  se určuje buď pomocí empirických vztahů, nebo pomocí bezrozměrných čísel obsahujících veličiny, jež mají vliv na daný případ přestupu tepla. Základní používaná bezrozměrná čísla jsou následující:

Nusseltovo číslo  $Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$

Reynoldsovo číslo  $Re = \frac{cl_0}{\nu}$

Prandtlovo číslo  $Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} = \frac{\nu \rho \cdot c_p}{\lambda}$

Grashoffovo číslo  $Gr = \frac{\alpha' g l_0 \Delta T}{\nu^2}$

**Tabulka T3** Přibližné hodnoty součinitele přestupu tepla  $\alpha$  (dle [7])

	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
Plyny při přirozené konvekci	6 – 35
Ohřívání a ochlazování vzduchu	1 – 60
Plyny proudící v trubkách a kolem nich	10 – 140
Ohřívání a ochlazování klidné vody	600
Voda při přirozené konvekci	100 – 1000
Voda při nucené konvekci	1000 – 23000

### Výpočet součinitele přestupu tepla a pro chladící kapalinu

#### Určení velikosti Reynoldsova čísla:

$$d := 0.00175$$

průměr chladícího kanálku [m]

$$\eta := 0.001$$

dynamická viskozita vody při 20 °C [Pa.s]

$$\rho := 1000 \quad \nu := \frac{\eta}{\rho}$$

kinematická viskozita vody [m<sup>2</sup>s]

$$S := \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad S = 2.405 \times 10^{-6} \quad \nu = 1 \times 10^{-6}$$

$$Q1 := 0.4 \quad Q2 := 0.6 \quad Q3 := 1 \quad \text{objemové průtoky [l/min]}$$

$$c1 := \frac{Q1}{60 \times 1000 S} \quad c1 = 2.772 \quad [\text{m/s}] \quad Re1 := \frac{c1 \cdot d}{\nu} \quad Re1 = 4.85 \times 10^3$$

$$c2 := \frac{Q2}{60 \times 1000 S} \quad c2 = 4.158 \quad [\text{m/s}] \quad Re2 := \frac{c2 \cdot d}{\nu} \quad Re2 = 7.276 \times 10^3$$

$$c3 := \frac{Q3}{60 \times 1000 S} \quad c3 = 6.929 \quad [\text{m/s}] \quad Re3 := \frac{c3 \cdot d}{\nu} \quad Re3 = 1.213 \times 10^4$$

#### Velikost Nusseltova čísla pro turbulentní proudění:

$$n := 0.4$$

velikost koeficientu pro ohřívání

$$c_p := 4.180$$

měrná tepelná kapacita vody [KJ/kgK]

$$\lambda := 0.6062$$

součinitel tepelné vodivosti vody [W/mK]

$$Pr := \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad Pr = 6.895 \times 10^{-3}$$

$$\text{Nu1} := 0.024 \text{Re1}^{0.8} \text{Pr}^n \quad \text{Nu1} = 2.912$$

$$\text{Nu2} := 0.024 \text{Re2}^{0.8} \text{Pr}^n \quad \text{Nu2} = 4.028$$

$$\text{Nu3} := 0.024 \text{Re3}^{0.8} \text{Pr}^n \quad \text{Nu3} = 6.062$$

Součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_1 := \frac{\lambda \cdot \text{Nu1}}{d} \quad \alpha_1 = 1.009 \times 10^3 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$\alpha_2 := \frac{\lambda \cdot \text{Nu2}}{d} \quad \alpha_2 = 1.395 \times 10^3 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$\alpha_3 := \frac{\lambda \cdot \text{Nu3}}{d} \quad \alpha_3 = 2.1 \times 10^3 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

#### 6.4.2 Okrajové podmínky pro simulaci

Co se týče chlazeného snímače a chladicího adaptéru bylo nutno zadat okrajové podmínky ve třech hlavních místech (dle předchozího výpočtu a **Tabulky T3**):

- na plochu chladicího kanálku (místo styku s chladícím médiem)  
 $\alpha = 1000 - 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$  při větších rychlostech proudění  
 $T_{chl} = 20 - 99 \text{ }^\circ\text{C}$
- na vnější povrch snímače a adaptéru vč. zástavbové matice  
 $\alpha = 15 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , při ofukování vzduchem  $\alpha = 50 - 60 \text{ W/m}^2\text{K}$   
 $T_{vzd} = 40 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$
- do místa přímého styku s výfukovými plyny  
 $\alpha = 50 - 60 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $T_{vp} = 650 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$

Okrajové podmínky na výfukovém potrubí jsou následující:

- vnitřní plocha  
 $\alpha = 50 - 60 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $T_{vp} = 650 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$
- vnější plocha  
 $\alpha = 15 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , při ofukování vzduchem  $\alpha = 50 - 60 \text{ W/m}^2\text{K}$   
 $T_{vzd} = 40 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$

## 6.5 Výsledky PC simulace v několika provozních režimech:

Okrajové podmínky byly voleny z části na základě předešlého experimentálního měření na stejném motoru i dynamometru, abychom dostali představu o velikosti teplot výfukových plynů v blízkosti chlazeného snímače a chladicího adaptéru, dále teplot okolního prostředí v jejich blízkosti v závislosti za zatížení. V každém následujícím výpočtu jsou zadávány různé hodnoty teplot okolního prostředí, výfukových plynů i chladicí kapaliny při stejné rychlosti proudění chladicí kapaliny.

Výpočet je zaměřen na vliv velikosti rychlosti proudění chladicí kapaliny kanálkem a na vliv ofukování výfukového potrubí. Dále se zaměřuje na určení maximální teploty plochy kanálku pro chladicí kapalinu, která dále určuje, zda je možné spolehlivě a přesně měřit tlak v daném místě.

Je důležité upozornit na některé odhadnuté okrajové podmínky pro součinitele přestupu tepla (pro nenucenou a nucenou konvekci vzduchu) a tím tedy výsledky jednotlivých simulací též považovat za odhadnuté.

### 6.5.1 Simulace 1

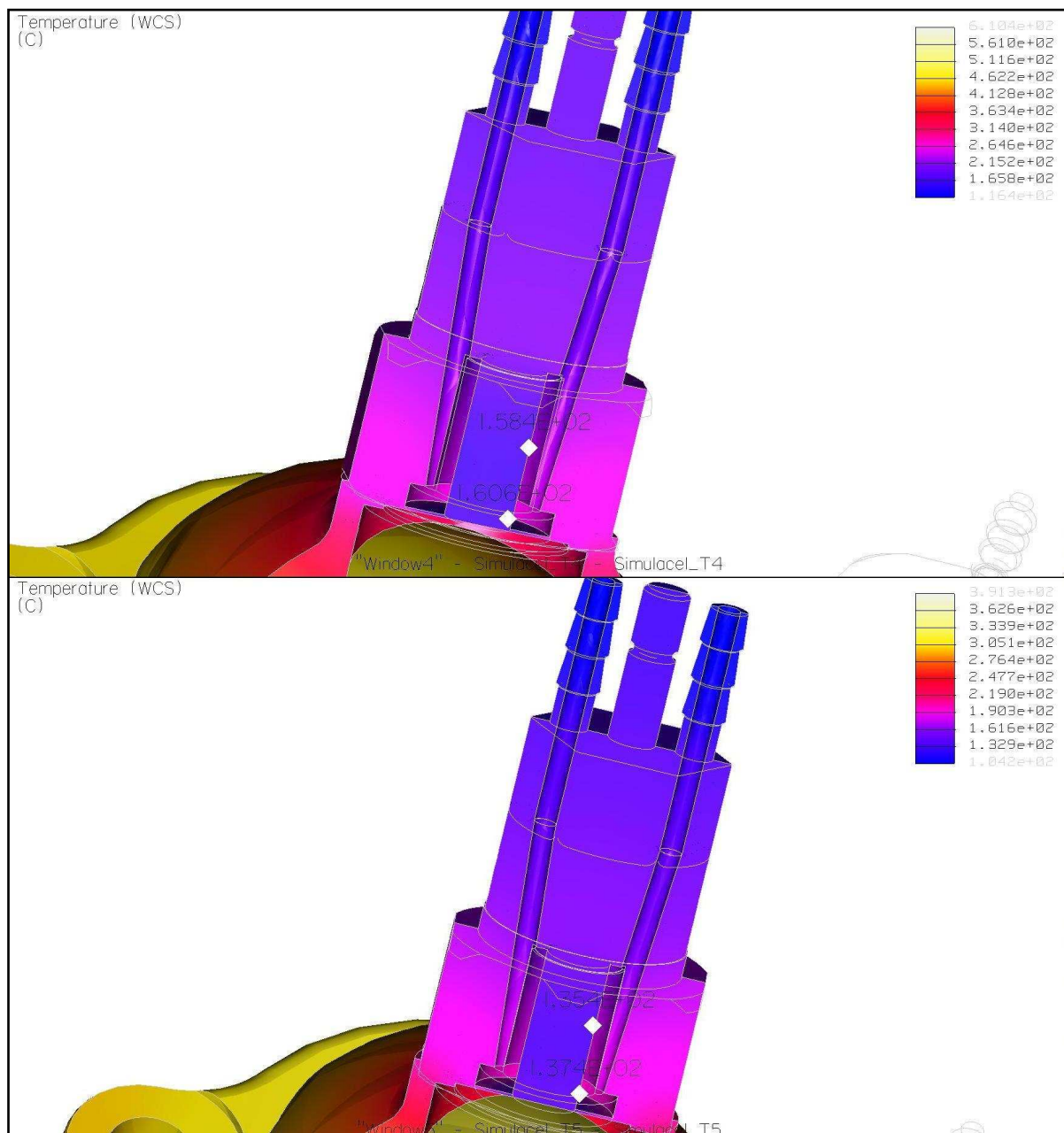
V prvním provozním režimu jsou porovnávány teploty jednotlivých dílů sestavy za předpokladu nízké rychlosti proudění chladicí kapaliny kolem (tj. spodní hranice hodnoty součinitele přestupu tepla mezi chladicí kapalinou a plochou kanálku snímače a adaptéru při nucené konvekci kapaliny). Dále jsou voleny maximální dosažitelné teploty výfukových plynů a chladicí kapaliny. Hodnoty v **Tabulce T5** navíc zohledňují ofukování oblasti výfukových plynů vzduchem.

**TABLULKA T4 – okrajové podmínky**

<b>V. POTUBÍ</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>CHL. SNÍMAČ</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>CHL. ADAPTÉR</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>
vnitřní povrch	900	50	kanálek	99	1000	kanálek	99	1000
vnější povrch	80	20	vnější plocha	75	20	vnější plocha	75	20
			matice	80	20	matice	80	20
			membrána	900	50	styk s výfuk. plyny	900	50

**TABLULKA T5 – okrajové podmínky**

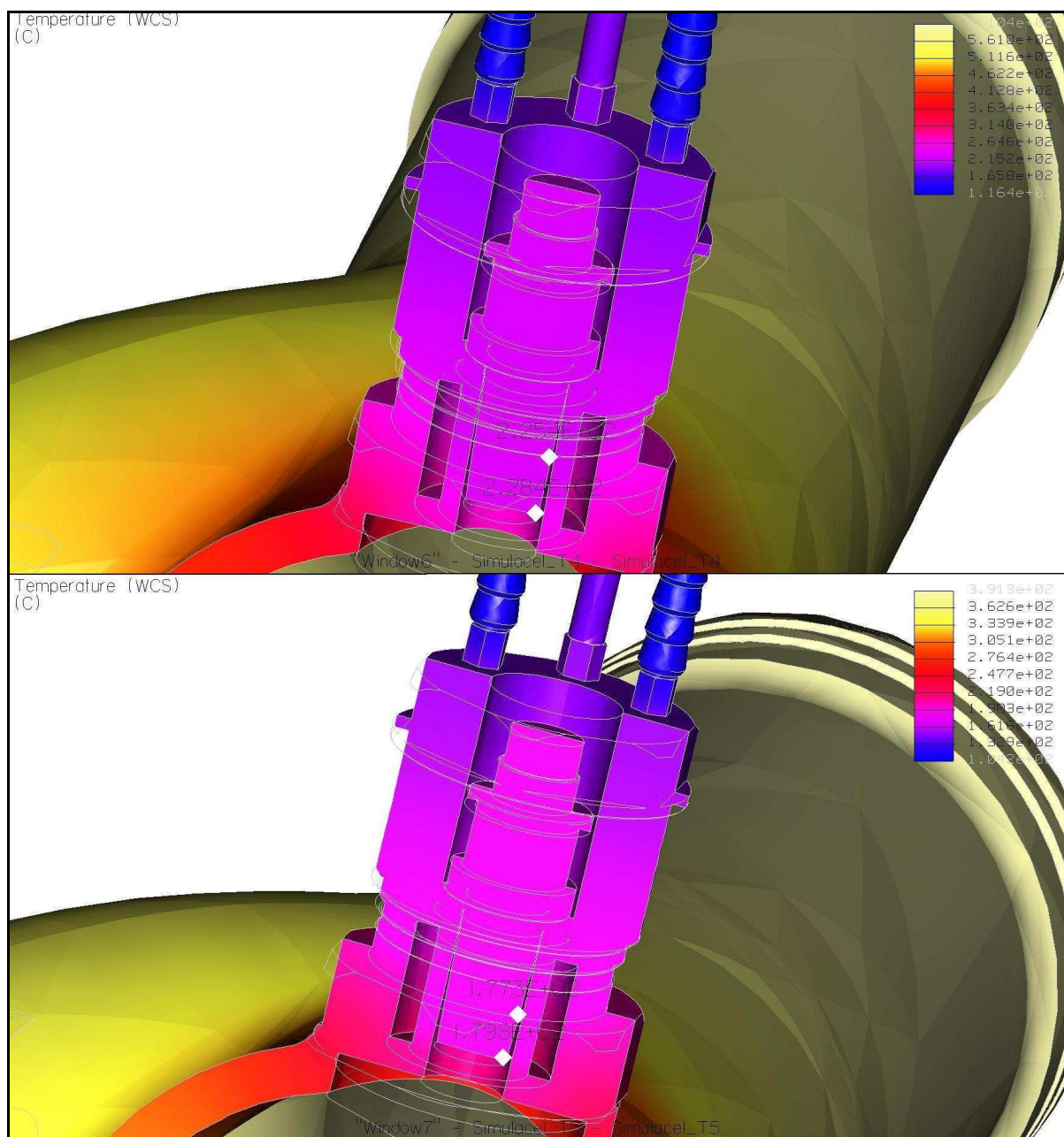
V. POTUBÍ	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	CHL. SNÍMAČ	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	CHL. ADAPTÉR	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
vnitřní povrch	900	50	kanálek	99	1000	kanálek	99	1000
vnější povrch	50	60	vnější plocha	45	60	vnější plocha	45	60
			matice	50	60	matice	50	60
			membrána	900	50	styk s výfuk. plyny	900	50



**Obr. 17. Rozložení teplot dle v chlazeném snímači dle okrajových podmínek uvedených v Tabulkách T4 a T5**



Výsledky simulace zobrazené na **Obr. 17** ukazují, že i přes velmi vysokou teplotu chladicí kapaliny a výfukových plynů se teplota v oblasti měřícího elementu chlazeného snímače AVL QC43D pohybuje okolo 160 °C. V případě ofukování povrchu výfukového potrubí okolo 140 °C.



**Obr. 18. Rozložení teplot dle v chladícím adaptéru dle okrajových podmínek uvedených v Tabulkách T4 a T5**

Co se týče chladicího adaptéru AVL AE O2 se teplota stěny v oblasti kontaktu měřící části možného zabudovaného snímače AVL GU21C pohybuje okolo 230 °C. V případě ofukování povrchu oblasti výfukového potrubí se teplota sníží na 180 °C.

Nechlazený snímač AVL GU21C má výrobcem udanou mezní provozní teplotu 400 °C.

### 6.5.2 Simulace 2

V tomto provozním režimu je uvažována větší rychlost proudění chladicí kapaliny, což zvyšuje součinitel přestupu tepla v chladicím kanálku. Dále nejsou chladicí snímač ani chladicí adaptér s nechlazeným snímačem zatíženy extrémními teplotami výfukových plynů teplotou okolního prostředí. Opět je v jednom případě zohledněno ofukování výfukových plynů vzduchem. Ostatní hodnoty jsou zadány dle **Tabulky T6 a T7**.

**TABLULKA T6 – okrajové podmínky**

V. POTUBÍ	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	CHL. SNÍMAČ	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	CHL. ADAPTÉR	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
vnitřní povrch	750	50	kanálek	50	1400	kanálek	50	1400
vnější povrch	80	15	vnější plocha	65	15	vnější plocha	65	15
			matice	70	15	matice	70	15
			membrána	750	50	styk s výfuk. plyny	750	50

**TABLULKA T7 – okrajové podmínky**

V. POTUBÍ	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	CHL. SNÍMAČ	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	CHL. ADAPTÉR	t [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
vnitřní povrch	750	50	kanálek	45	1400	kanálek	45	1400
vnější povrch	50	50	vnější plocha	45	50	vnější plocha	45	50
			matice	50	50	matice	50	50
			membrána	750	50	styk s výfuk. plyny	750	50

Grafické znázornění výsledku simulace 2 je uvedeno v **Příloze 7**. Výsledkem tepelného namáhání chlazeného snímače jsou velmi nízké teploty. Při teplotě chladicí kapaliny 50 °C je dosažena teplota ve stejném bodě jako předchozí simulace 90 °C.

Při ofukování povrchu výfukového potrubí a teplotě chladicí kapaliny 45 °C se zde teplota snížila o 17 °C.

U adaptéru se zabudovaným snímačem se maximální teplota v oblasti měřících prvků pohybovala okolo 150 °C. Při ofukování by tato teplota klesla na 115 °C.

### 6.5.3 Simulace 3

V poslední simulaci je ještě více snížena teplota výfukových plynů. Tento výpočet simuluje provozní režim motoru při nízké zatížení a naopak vysokou rychlost proudění chladicí kapaliny o relativně nízké teplotě.

**TABLULKA T8 – okrajové podmínky**

<b>V. POTUBÍ</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>CHL. SNÍMAČ</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>CHL. ADAPTÉR</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>
vnitřní povrch	660	50	kanálek	40	2100	kanálek	40	2100
vnější povrch	65	35	vnější plocha	70	20	vnější plocha	70	20
			matice	75	20	matice	75	20
			membrána	660	50	styk s výfuk. plyny	660	50

**TABLULKA T9 – okrajové podmínky**

<b>V. POTUBÍ</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>CHL. SNÍMAČ</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>CHL. ADAPTÉR</b>	<b>t [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>
vnitřní povrch	660	50	kanálek	35	2100	kanálek	35	2100
vnější povrch	50	55	vnější plocha	45	55	vnější plocha	45	55
			matice	50	55	matice	50	55
			membrána	660	50	styk s výfuk. plyny	660	50

Grafické znázornění výsledku simulace je uvedeno v **Příloze 8**. V tomto případě bylo dosaženo velmi nízkých teplot v oblasti měřících prvků, které nepřekračují teplotu 60 °C. Nejvyšší hodnota byla zjištěna na chladícím adaptéru v měřící části případného nechlazeného snímače, a to 117 °C.

## 7 Experimentální měření vzorku vodního chlazení

Experimentální měření bylo provedeno v Laboratoři PSM TUL v Liberci na zkušebním stanovišti 6. Zde je na dynamometru umístěn tříválcový motor Škoda 1.2 HTP. Měření bylo provedeno v několika provozních režimech. Rozhodujícími měřenými parametry pro porovnání výsledů jsou teplota výfukových plynů  $t_{vp}$  a teplota chladicí kapaliny  $t_{chl}$  při určitém pracovním režimu daném velikostí točivého momentu  $M_t$  a otáčkami  $n$ .

Dalším důležitým úkolem bylo ověření výdrže čerpacího zařízení. Jelikož jsou tato zařízení primárně navrhována a vyráběna pro 30 sekundové zatížení, tak dochází k jejich značnému ohřívání. Byl tedy otestován jejich chod při nižším napájecím napětí 6V.

### 7.1 Snímače na výfukovém potrubí

Toto experimentální měření bylo provedeno na dvou různých místech výfukového potrubí motoru Škoda snímači:

1. Miniaturním snímačem od výrobce AVL GU21C s měřícím elementem z ortofosforečnanu galia (parametry viz Příloha X.), který je zabudován v chladícím adaptéru téhož výrobce AVL AE 02 pro možnost měření absolutního tlaku (parametry viz Příloha X.). Snímač je umístěn ve svodovém výfukovém potrubí v blízkosti hlavy válců.

*Pozn. Výsledky teoretického výpočtu tepelného namáhání chladicího adaptéru AVL AE jsou uvedeny v kapitole 5.*

2. Zaslepeným chladícím adaptérem AVL 4200.7 větší konstrukce než je adaptér AVL AE 02, tj. s větším průměrem vstupního a výstupního kanálku. Tento adaptér je ve výfukovém potrubí umístěn na vstupu do katalyzátoru.

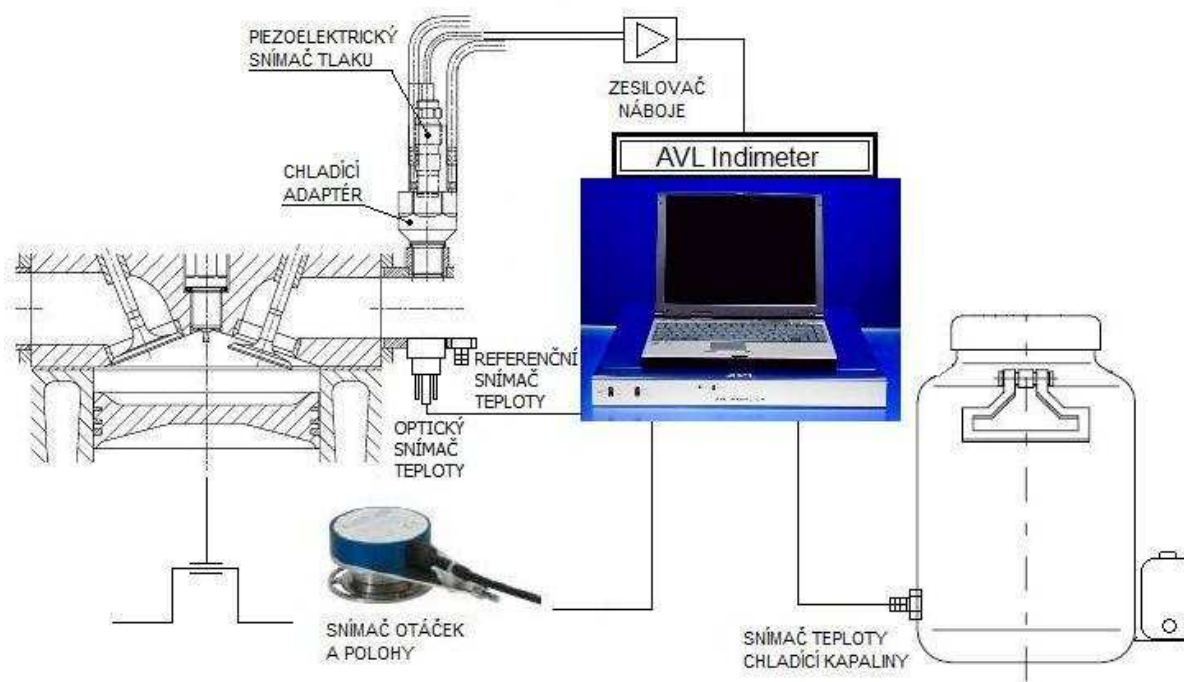
V měřícím místě 1 je mnohem vyšší tlak výfukových plynů než je tomu v měřeném místě 2. Místní tlaková špička se objevuje vždy na počátku výměny obsahu válce. Zvýšení tlaku je způsobeno přesměrováním toku výfukových plynů. Naopak zde není dosahováno takové střední teploty jako v místě 2, tedy na vstupu do katalyzátoru, a tím by měl být méně teplotně namáhán.

## **7.2 Měřicí řetězec a jeho přesnost**

Měřicí systém sestavený z HW částí (dílů podporovaných příslušným SW) tvoří měřicí řetězec. Na vstupu je analogový signál ve formě elektrického náboje a na výstupu je digitální systém v podobě elektrického napětí.

Jednotlivé části měřicího řetězce jsou propojeny sériově tak, že dochází ke sčítání chyb. Abychom toto eliminovali, provádíme kalibraci ve funkčním zapojení celého řetězce s rozsahy zesilovače a A/D převodníku nastavenými na nejvyšší citlivost. Přesnost skutečného měření je pak nejvíce ovlivněna cyklickým teplotním driftem tlakového signálu snímače uvnitř každého cyklu pracovního oběhu, který je namodulován na pomalý drift, způsobený střídavým zatížením snímače po více cyklech. Úroveň těchto teplotních špiček je dána skutečnou provozní proměnlivostí teplot a zatížením v sledovaném místě konkrétního spalovacího motoru a samozřejmě kvalitou snímače. Některé zesilovače jsou vybaveny kompenzací tohoto driftu. Další možné nepřesnosti při měření mohou být způsobeny chybami vznikajícími při zástavbě snímače a měřicího řetězce, zvláště pak:

- nesprávná volba umístění snímače vůči vibracím
- nedodržení předepsaných tolerancí, čistoty, těsnění stykových ploch a utahovacích momentů závitových spojů
- znečištění konektorů kabelů vlivem vysoké vlhkosti vzduchu, dotykem rukou
- nedodržení předepsaného způsobu chlazení snímače (průtokové množství a stacionarita tlaku – bez pulsací a vibrací vodního sloupce)



**Obr. 19** Blokové schéma experimentálního měření

### 7.2.1 Motor

Motor, na kterém proběhlo měření, je kapalinou chlazený zážehový tříválec Škoda 1.2 HTP o výkonu 40 kW. Blok motoru i hlava válců jsou vyrobeny z hliníkové litiny, výfukové potrubí z oceli. Motor je provozován na Natural 95, ale je také přizpůsoben pro provoz na CNG a LPG. Ke konci klikového hřídele byl nainstalován snímač otáček a polohy pro indikaci tlaku ve válci.

Parametry motoru:

$V_M = 1198 \text{ cm}^3$ ;  $D/Z = 76,5/86,9 \text{ mm}$ ;  $L = 138 \text{ mm}$ ; 2 ventily/válec; OHC;  $\varepsilon = 13.1$

### 7.2.2 Dynamometr MEZServis ASD 235 M250

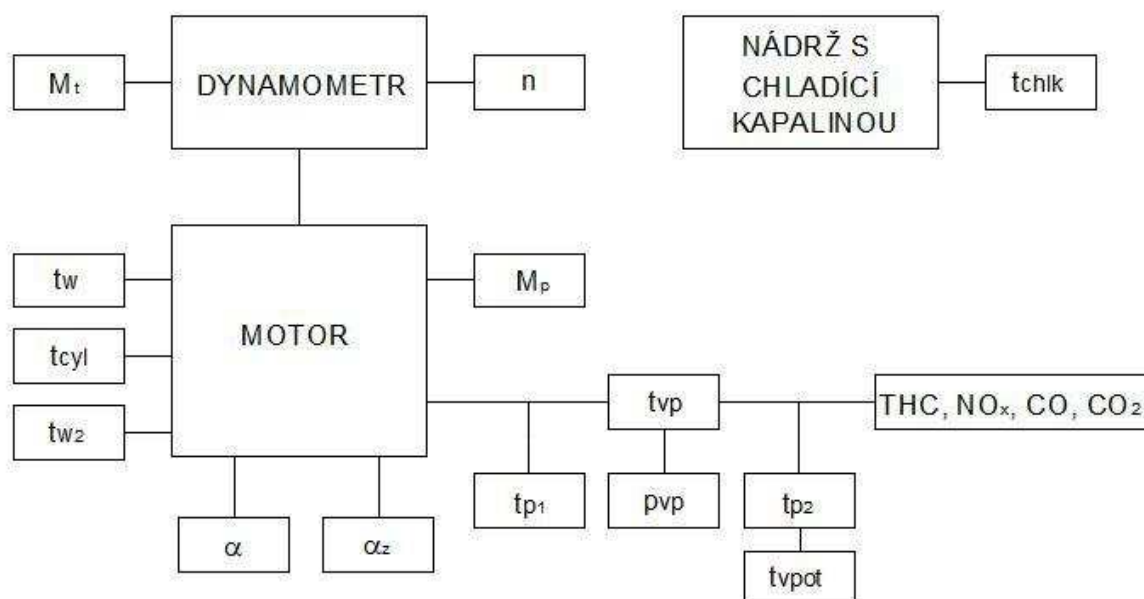
Tento dynamometr je konstruován na bázi vysokootáčkového asynchronního stroje vybaveného tenzometrickou měřicí přírubou a inkrementálním snímačem otáčivé rychlosti. Toto uspořádání umožňuje měření a regulaci poháněcích a zatěžovacích kroutících momentů včetně moment vznikajících při dynamickém zatěžování od setrvačných hmot a tím simulovat a měřit průběhy dynamických testů. Regulaci otáček a momentu provádí přímo digitální regulační obvody.

**Tabulka T10 Technické parametry zařízení**

VÝKON (mot./gen) [kW]	ROZSAH OTÁČEK [1/min]	ROZSAH MOMENTŮ [Nm]
235/250	100 – 9000	460/480

Měření veličin (dle **Obr. 20**)

- Otáčky motoru  $n$  (dynamometr)
- Točivý moment  $M_t$  (dynamometr)
- Teploty – vody  $t_w$ , oleje  $t_{w2}$ , teplota vzduchu  $t_{cyl}$  (odporové teploměry Pt 100), výfukových plynů  $t_{vp}$  teplota chladicí kapaliny v nádrži  $t_{chlk}$  (termočlánky), teploty povrchů chladících adaptérů  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  a výfukového potrubí  $t_{vpot}$  v jejich blízkosti (infračervený teploměr)
- Tlaky – výfukových plynů  $\Delta p_{vp}$ , vzduchu  $\Delta p$  (digital manometer)
- Velikost průtoku chladicí kapaliny – experimentálně změřeno pomocí nádoby o obsahu 1 l. Výsledkem je průtok o velikosti 0.6 l/min
- Emise výfukových plynů THC, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>
- Množství paliva –  $M_p$  [kg/hod]
- Další veličiny – klapka [%], předstih zážehu [°KH]

**Obr. 20 Blokové schéma čidel pro měření**

### 7.2.3 Snímač otáček a polohy klikového hřídele

Optoelektronický inkrementální rotační snímač převádí informaci o vzájemné úhlové poloze dvou mechanických celku na elektrické impulsy (inkrementy). Počet impulsů odpovídá velikosti změny polohy a frekvence impulsů odpovídá rychlosti pohybu.

### 7.2.4 Infračervený teploměr CEM DT – 8819

Tento infračervený teploměr s laserovým zaměřováním měří bezdotykově teploty v rozsahu  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tímto teploměrem bylo měřeno povrchové teplotní namáhání dílů (chladících adaptérů a katalyzátoru). Chyba měření mohla být způsobena lesklým povrchem měřených adaptérů, jelikož je tento teploměr určen k měření teploty černého tělesa. Negativní vliv na měření také mohlo mít sálání tepla z výfukového potrubí.

### 7.2.5 AVL Indimeter 619

Toto zařízení výrobce AVL ve skříňovém kompletu s odstíněným napájecím zdrojem obsahuje integrovanou analogovou a digitální část pro řízení, zpracování a následný převod vstupních dat na výstupní.

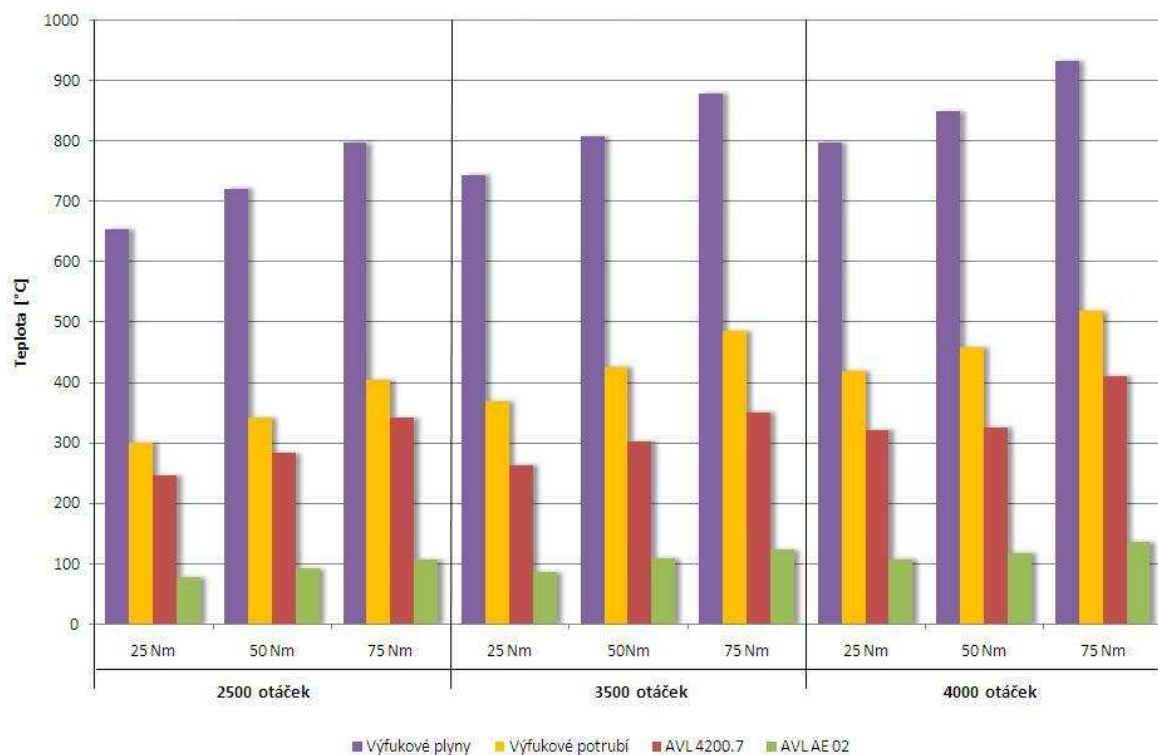
Prostřednictvím tohoto zařízení je možná:

- vysokotlaká indikace – monitorování a analýza tlaku ve válci
- nízkotlaká indikace – monitorování tlaku v sacím a výfukovém potrubí
- indikace dalších napěťových signálů (od lambda sondy, vstřikovačů, zapalování atd.)

## 7.3 Vlastní měření

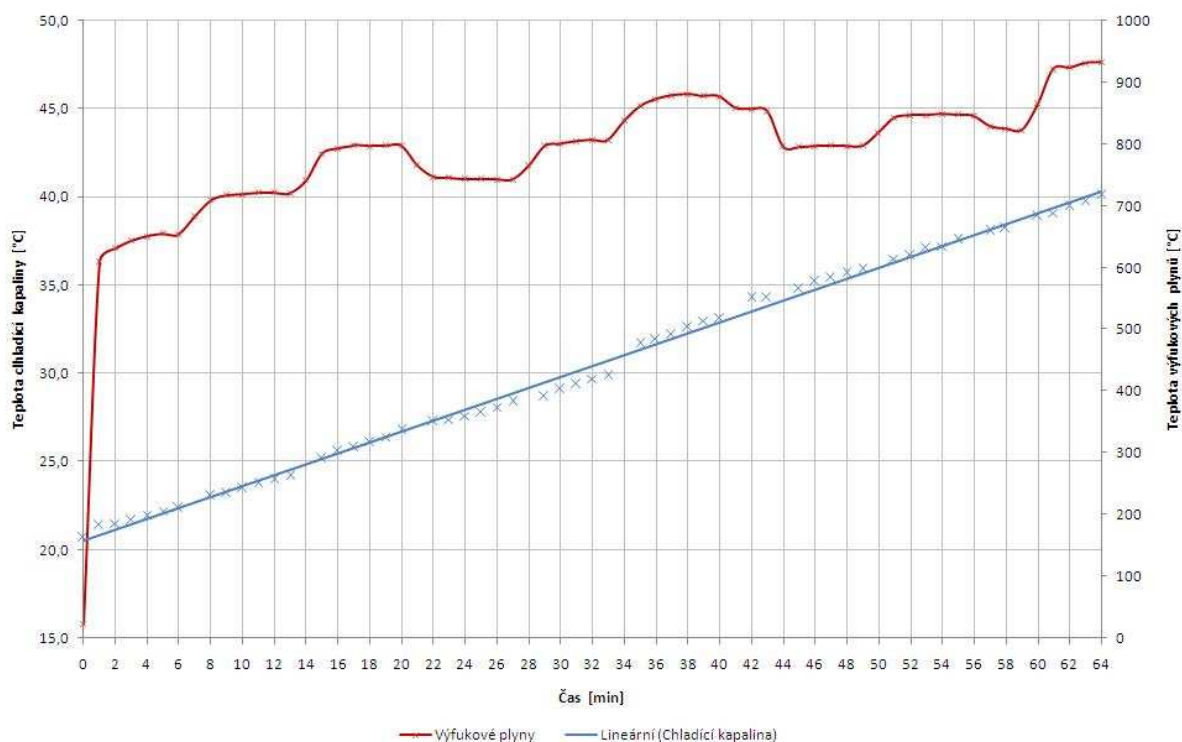
Měření proběhlo ve třech otáčkových režimech motoru (2500 1/min, 3500 1/min a 4000 1/min) při třech různých zatíženích v každém režimu (25 Nm, 50 Nm a 75 Nm). Teploty byly zaznamenávány v minutových intervalech. Pro grafické znázornění teplot byla vybrána teplota dosažená po pěti minutách v každém provozním režimu. Výsledky jsou znázorněny na **Obr. 21**.





**Obr. 21. Naměřené teploty v různých provozních režimech motoru**

Použitý objem chladicí kapaliny v nádrži byl 14 l. Byla zjišťována závislost rostoucí teploty chladicí kapaliny na čase. Celková doba měření byla 60 minut. Tím byla rovněž ověřena funkce celého chladicího systému. Průběh ohřívání chladicí kapaliny v nádrži je znázorněn na **Obr. 22**.

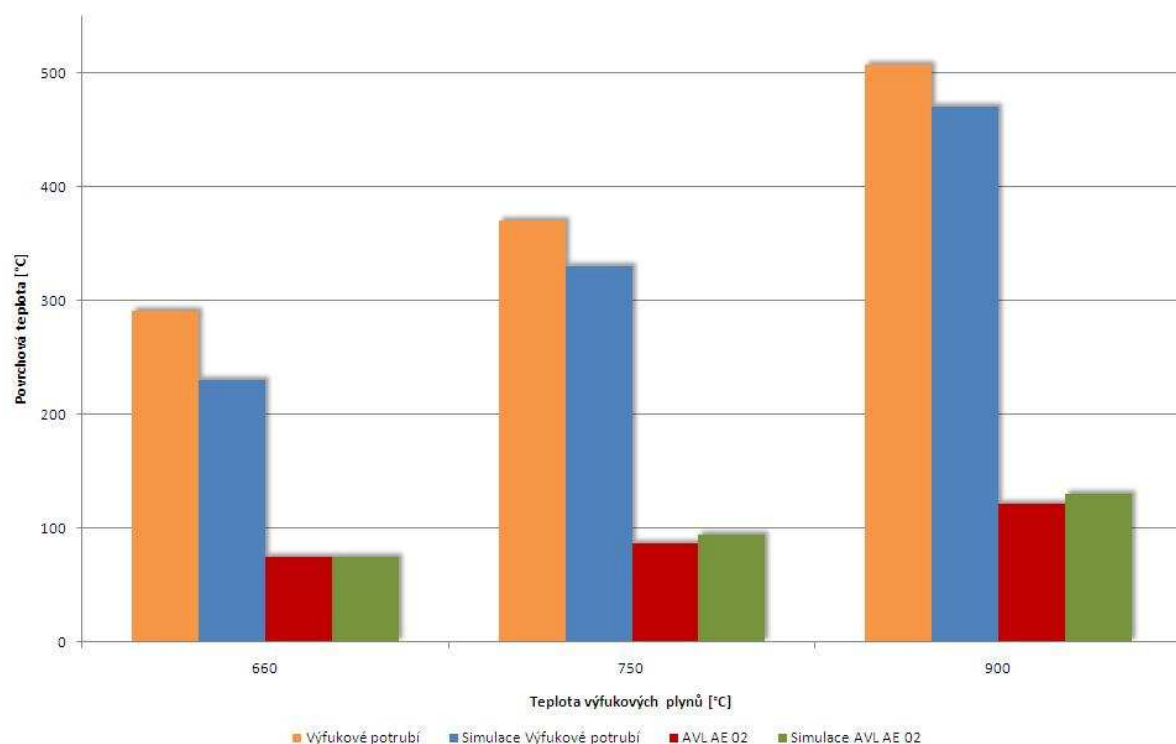


**Obr. 22 Průběh teploty chladicí kapaliny uvnitř nádrže a teploty výfukových plynů v závislosti na čase**

Z **Obr. 22** je zřejmý lineární nárůst teploty chladicí kapaliny o celkovém objemu 14 l. Pro méně strmý průběh ohřívání chladicí kapaliny by bylo zapotřebí použití většího objemu kapaliny.

Do grafu je rovněž zanesena křivka teploty výfukových plynů, na které lze pozorovat změny zatížení motoru. V čase od 1. do 20. minuty byly otáčky motoru 2500 1/min. V čase od 21. do 43. minuty byly otáčky motoru zvýšeny na 3500 1/min, přičemž v posledních třech minutách bylo výfukové potrubí ofukováno ventilátorem pro zjištění vlivu sálání na teploty povrchů chladících adaptérů. Od 43. minuty následoval režim s 4000 otáčkami za minutu. V rozmezí 53. až 56. minuty byl opět spuštěn ventilátor. V jednotlivých otáčkových pásmech vždy bylo zvyšováno zatížení motoru ve třech krocích, a to 25, 50 a 75 Nm.

## 7.4 Porovnání naměřených hodnot a simulace



**Obr.23 Naměřené a simulované povrchové teploty v závislosti na teplotě výfukových plynů**

Z **Obr. 23** je zřetelný rozdíl mezi naměřenými a simulovanými hodnotami. Maximální rozdíl teplot činí 60 °C. Rozdíly mohly být způsobeny volbou okrajových podmínek u simulací a 3D modelem výfukového potrubí, které se přesně neshoduje s potrubím použitým při měření.

## 8 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá třemi hlavními úkoly, a to konstrukčním návrhem uspořádání vodního chlazení nízkotlakých snímačů ve výfukovém potrubí, dále simulací tepelného zatížení těchto snímačů a nakonec i experimentálním ověřením funkčnosti vzorku chladicího systému.

V části zabývající se návrhem se vycházelo z požadavků na jednoduchost a nízké pořizovací náklady celého zařízení. Z těchto důvodů byly k pohonu celého chladicího systému vybrány čerpací jednotky APO 040, které se používají k čerpání ostřikovací kapaliny v osobních automobilech. Jelikož jsou tyto čerpací jednotky primárně navrhovány pro provozní dobu max. 30 s, bylo nutné snížení provozních parametrů – otáčky elektromotoru, a tím prodloužení provozní doby.

Pro porovnání s naměřenými hodnotami bylo nutné provést PC simulaci tepelného zatížení. Výsledky simulací tepelného zatížení lze považovat pouze za odhad, a to z důvodu velmi obtížného přesného určení součinitele přestupu tepla, který navíc značně kolísá. I v nehorším možném případě, tzn. velmi vysoké teploty chladicí kapaliny a výfukových plynů současně s nízkou rychlostí proudění chladicí kapaliny a s nenucenou konvekcí okolního vzduchu, zjištěné teploty nepřekročily maximální výrobcem udané provozní teploty snímačů.

Nejdůležitější částí diplomové práce bylo ověření chladících schopností navrženého systému v reálných podmínkách. Systém byl vystaven několika provozním režimům motoru. Ve všech těchto režimech byl systém schopen spolehlivě ochladit snímače tlaku. Tím byla potvrzena funkčnost celého zařízení.

Rozdíly zjištěné při porovnání naměřených povrchových teplot s výsledky simulace mohl být způsoben obtížným určením stejného bodu měření povrchové teploty u simulace a ve skutečnosti, dále lesklým povrchem snímače a vlivem sálání tepla z výfukového potrubí. Přestože dosažené teploty na povrchu snímačů byly daleko pod maximální provozní hodnotou, bylo by vhodné stálé ofukování výfukového potrubí motoru vzduchem k prodloužení životnosti a k udržení hodnoty citlivosti snímače.

## 9 Použitá literatura

- [ <sup>1</sup> ] Kistler.: Pressure sensors. Catalogue
- [ <sup>2</sup> ] AVL.: Engine Indicating. User Handbook
- [ <sup>3</sup> ] Kistler.: Engine Combustion Analysis. Catalogue
- [ <sup>4</sup> ] Kistler.: Piezoresistive Pressure Sensors. Catalogue
- [ <sup>5</sup> ] Beroun S.: Vozidlové motory (Učební materiály TU Liberec), TUL
- [ <sup>6</sup> ] Dvořák Z.: Sdílení tepla a výměníky, ČVUT Praha 1994
- [ <sup>7</sup> ] Doebelin E.: Measurement Systems, New York 1990
- [ <sup>8</sup> ] SW ProMECHANICA, PTC Inc.
- [ <sup>9</sup> ] Černoch S.: Strojně technická příručka, STNL Praha 1968
- [ <sup>10</sup> ] Vávra P. a kolektiv.: Strojnické tabulky, Albra 2003
- [ <sup>11</sup> ] Vlk F.: Anglicko – český odborný slovník motorových vozidel, Brno 2001

### Internet:

- [ <sup>I-1</sup> ] [www.hwg.cz](http://www.hwg.cz)
- [ <sup>I-2</sup> ] [www.kistler.com](http://www.kistler.com)
- [ <sup>I-3</sup> ] [www.avl.com](http://www.avl.com)

## **Chlazené piezoelektrické snímače AVL QC34D**



## Sensors



## QC34D

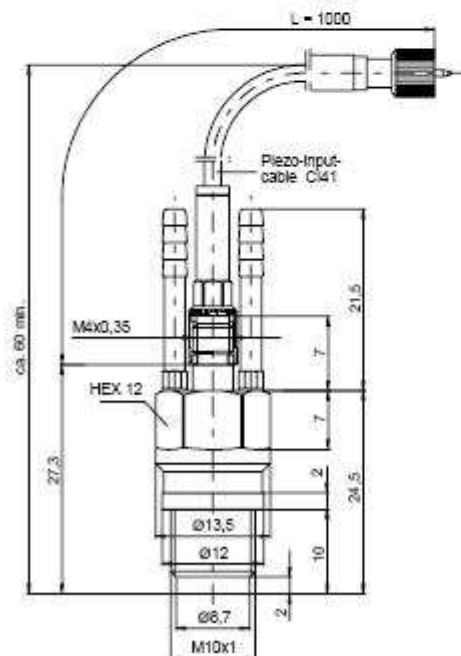
## Quartz Pressure Transducer

Art. No. TIGG0869A.01

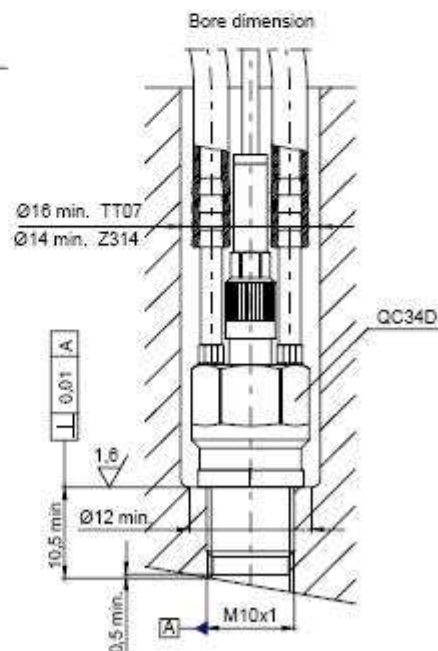
The QC34D offers highest available accuracy in the M10 thread type segment and is therefore suited for all high precision pressure measurement tasks IC-engines.

Due to the M10 mounting thread this transducer can easily be screwed in directly as well as by means of an adaptor sleeve.

A temperature controlled cooling system becomes needless because the sensor shows a high insensibility towards a breakdown of the cooling system. Additional the sensor is working properly up to a temperature of 350 °C.



### Dimensions



### Example for direct installation

Last Update: December 2004

1

**Chlazené piezoelektrické snímače AVL QC34D**

THE THRILL OF SOLUTIONS.		AVL
QC34D Quartz Pressure Transducer		
<i>Standard Specifications</i>		
Measuring Range	0...250 bar (3625 psi), 25 MPa	
Lifetime	> 10 <sup>8</sup> load changes	
Overload	300 bar (4350 psi), 30 MPa	
Sensitivity (nominal)	19 pC/bar (1.31 pC/psi), 190 pC/MPa	
Linearity	< ±0.2 % FSO	
Natural Frequency	69 kHz	
Acceleration	< 0.013 bar/g with cooling water	
Sensitivity	< 0.003 bar/g without cooling water	
Temperature coefficient of sensitivity	0.003 %/°C at 20...80°C (68...176°F)	
Insulation Resistance at 20°C (68°F)	> 10 <sup>13</sup> Ω	
Capacitance	10 pF	
Cooling water	rate of flow min. 20l/h pressure max. 2.0 bar (29 psi)	
Mass (without cable)	15 grammes	
Mounting Torque	10 Nm (for adaptors refer to drawings)	
<i>Thermodynamic Specifications</i>		
Cyclic Temperature Drift	< ±0.3 bar	
<i>Load Change Drift</i>		
Max. Zero-line Gradient dp/dt	4.5 mbar/ms	
Permanent Zero-line Deviation	5 bar	
IMEP-Stability	< 2 %	
<i>Scope of Supply</i>		
1 Transducer QC34D	1 Protection cap	
1 Piezo-Input cable CI41 plus coupling CC41, fitted	1 Calibration sheet	
2 Spare O-rings for cable	1 Specification sheet	
1 Gasket SG20 (fitted)	1 Brief description	
1 Spare gasket SG20		
Last Update: December 2004		2



**Chlazené piezoelektrické snímače AVL QC34C**

THE THRILL OF SOLUTIONS.



## Sensors

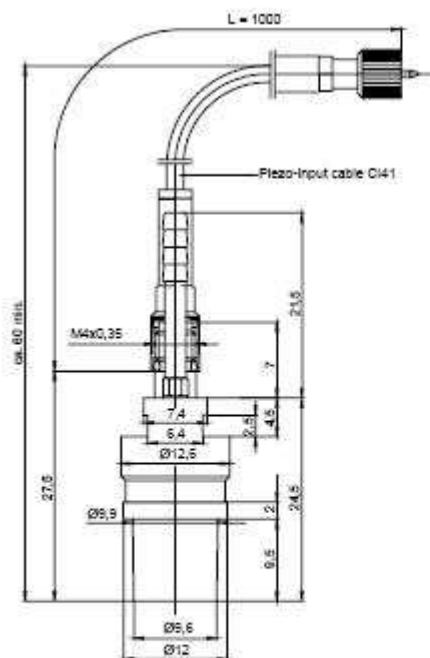


QC34C  
Quartz Pressure Transducer  
Art. No. TIGG0867A.01

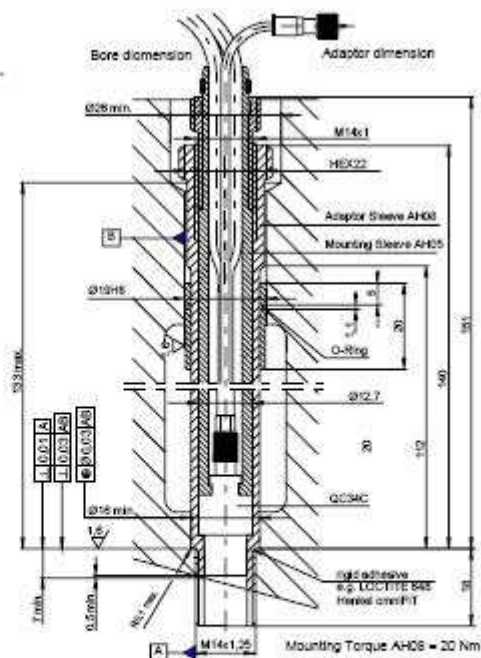
The watercooled QC34C represents an ideal solution for measurements in engines with cylinder bores of less than 100 mm and high requirements on the measurement results.

The plug-in design with a mounting adapter makes these transducer particularly suitable for water-cooled engines.

A temperature controlled cooling system becomes needless because the sensor shows a high insensibility towards a breakdown of the cooling system. Additionally the sensor is working properly up to a temperature of 350 °C.



Dimensions



Installation by means of Adaptor-Set AS02


Last Update: December 2004

1



**Chlazené piezoelektrické snímače AVL QC34C**

THE THRILL OF SOLUTIONS.



QC34C Quartz Pressure Transducer

Standard Specifications

Measuring Range	0...250 bar (3625 psi), 25 MPa
Lifetime	> 10 <sup>8</sup> load changes
Overload	300 bar (4350 psi), 30 MPa
Sensitivity (nominal)	19 pC/bar (1.31 pC/psi), 190 pC/MPa
Linearity	< ±0.20 % FSO
Natural Frequency	69 kHz
Acceleration	< 0.013 bar/g with cooling water
Sensitivity	< 0.003 bar/g without cooling water
Temperature coefficient of sensitivity	0.003 %/°C at 20...80°C (68...176°F)
Insulation Resistance at 20°C (68°F)	> 10 <sup>13</sup> Ω
Capacitance	10 pF
Cooling water	rate of flow min. 20l/h pressure max. 2.0 bar (29 psi)
Mass (without cable)	15 grammes
Mounting Torque (in Adaptor)	15 Nm (for adaptors refer to drawings)

Thermodynamic Specifications

Cyclic Temperature Drift	< ±0.30 bar
Load Change Drift	
Max. Zero-line Gradient dp/dt	5.5 mbar/ms
Permanent Zero-line Deviation	5 bar
IMEP-Stability	< 2 %

Accessories

Cables and Couplings	CI41, CC41, E124-10
Cable-Mounting Tool	TC01
Gasket	SG20
Dismounting Tool for gasket	TT15
Dummy	DG05
Adaptor	AS02 (AH05, AH08)
Mounting Spray	SF01
Cooling System	ZP91.00/1-4 (8)
Cooling tube	ZP90.40 (2.3 x 0.75 Viton)

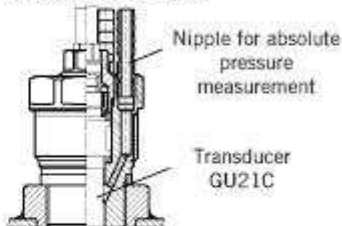
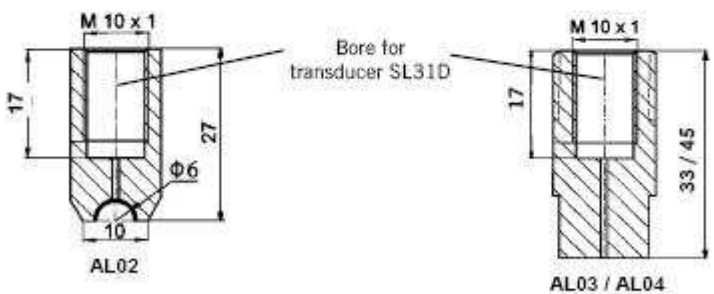
Scope of Supply

1 Transducer QC34C	1 Protection cap
1 Piezo-Input cable CI41 plus coupling CC41, fitted	1 Calibration sheet
2 Spare O-rings for cable	1 Specification sheet
1 Gasket SG20 (fitted)	1 Brief description
1 Spare gasket SG20	

Last Update: December 2004

2

**Chladicí adaptér AVL AE 02**

THE THRILL OF SOLUTIONS.				AVL
Damping and Solder-On Adaptors				
<p><b>Damping Adaptor:</b></p> <p>For the low pressure measurement of the gas exchange at intake and exhaust line the transducer GU21C together with a Damping Adaptor AE02 is recommended. The Damping Adaptor has following main features:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Damping of the transducer against vibrations</li> <li>• Cooling of the transducer (especially at the exhaust line)</li> <li>• Absolute pressure measuring nipple for Absolute Pressure Sensor DMP4040 (TI600LDE.01)</li> </ul> <p><b>Damping Adaptor AE02</b></p> 				
Transducer	Type	Art.No.	Mounting Thread	Outer Ø
GU21C	AE02	WG0191	M14	25
<p><b>Solder-On Adaptor:</b></p> <p>Recommended for easy installation of High Pressure Transducers.</p> <p>For the transducers SL31D there are 3 different types (different line diameters) available.</p> 				
Transducer	Type	Art. No.	For Line Diameter	
SL31D-2000 SL31D-200	AL02	WG0199	6	
	AL03	WG0201	4 to 10	
	AL04	WG0202	8 to 20	
Last Update: January 2002				11

## Nechlazený snímače AVL GU21C

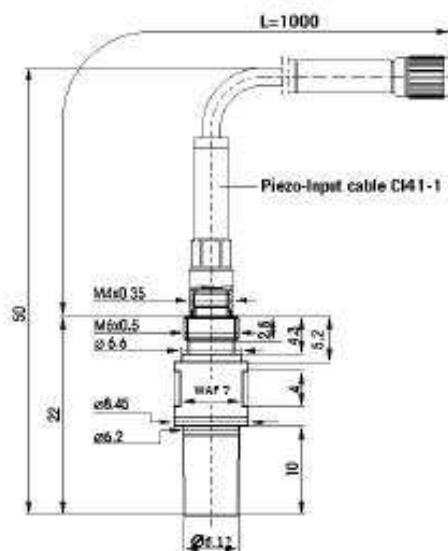


## Sensors

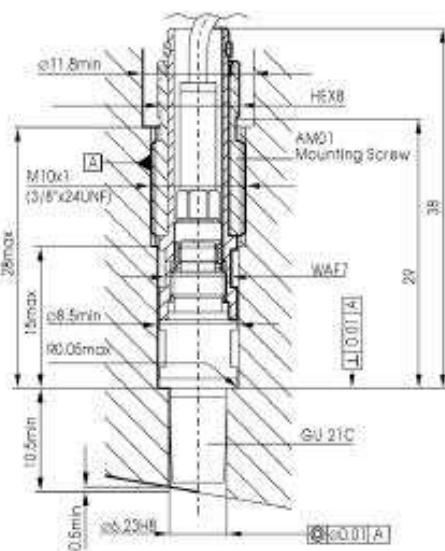


GU21C  
Transducer Uncooled  
Art. No. GG0498

The well-established design of the GU21C (plug-in version Ø 6.2mm) makes it universally applicable. Its excellent specifications make it the best choice for thermodynamic evaluations based on uncooled transducers. The GU21C's high output signal (35pC/bar) makes it immune against undesired signal interference.



### Dimensions



*Installation by means of  
Mounting Screw AM01*

Last Update: January 2002

**Nechlazený snímač AVL GU21C**

THE THRILL OF SOLUTIONS.

AVL

GU21C Transducer Uncooled

**Standard Specifications**

Measuring Range	0...250 bar (3625 psi), 25 MPa
Lifetime	> 10 <sup>8</sup> load changes
Overload	300 bar (4350 psi), 30 MPa
Sensitivity (nominal)	35 pC/bar (2.41 pC/psi), 350 pC/MPa
Linearity	<±0.3 (0.1)* % FSO
Natural Frequency	85 kHz
Acceleration Sensitivity	< 0.002 bar/g
Shock Resistance	> 2000 g
Operating Temperature Range	up to 400°C (750°F)
Thermal Sensitivity Shift	20...400°C <±2% 200...300°C <±0.5%
Insulation Resistance at 20°C (68°F)	>10 <sup>13</sup> Ω
Capacitance	8 pF
Mass (without cable)	5.5 grammes
Mounting Torque	10 Nm (for adaptors refer to drawings)

**Thermodynamic Specifications**

Cyclic Temperature Drift	< ±0.4 (0.2)* bar
Load Change Drift	
Max. Zero-line Gradient dp/dt	1,5 mbar/ms
Permanent Zero-line Deviation	8 bar
IMEP-Stability	< 2 %

\*) Selected transducers GU21C (Art. No. GG0681) with specifications in ( ) can be supplied upon request.

**Scope of Supply**

1 Transducer GU21C	1 Protection cap
1 Piezo-Input cable CI41-1 plus Coupling CC41, fitted	1 Calibration sheet
2 Spare O-rings for cable	1 Specification sheet
1 Gasket SG02 (fitted) +1 Spare gasket	1 Brief description

**Accessories**

Cables and Couplings	CI41-1, CI42-1 (metal mesh), CC41, E124-10
Cable-Mounting Tool	TC01
Gasket	SG02
Dismounting Tool for gasket	TT10
Dummy	DG03
Removal Tool	TD01
Adaptor	AM01, AM02, AH16, AE02
Machining Tool	MS21 (MD21, MT31), MS24 (MD24, MT31)
Mounting Tool	TS02 (TT09, TT02), TA13
Mounting Spray	SF01

Last Update: January 2002

2



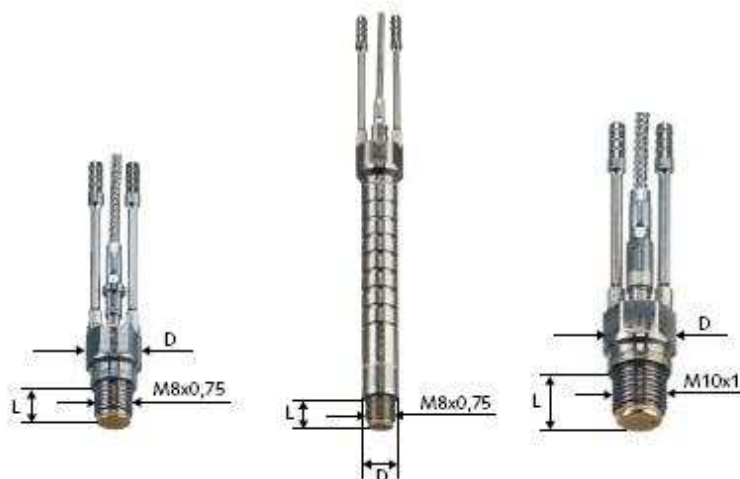
## Chlazené snímače KISTLER Piezoelectric Sensors

### Sensors and Probes, Water-cooled

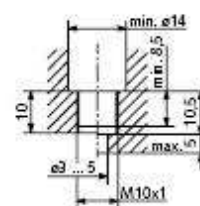
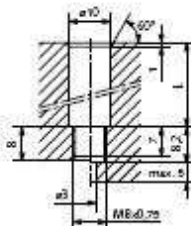
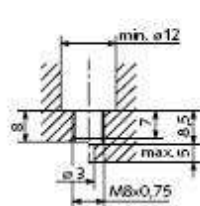
M8 sensor Thermo-  
Comp®

M8 probe ThermoComp®

M10 ThermoComp®  
quartz pressure sensor



Technical data		Type 6041A...	Type 6043A...	Type 6061B...
Measuring range	bar	0 ... 250/... 300*	0 ... 250/... 300*	0 ... 250/... 300*
Sensitivity	pC/bar	~20	~20	~25
Natural frequency	kHz	~70	~70	~90
Linearity	%FSO	≤±0,5	≤±0,5	≤±0,5
Temperature range	°C	-20 ... 350	-20 ... 350	-20 ... 350
Sensitivity change				
50 °C ±35 °C (cooled) %		≤±0,5	≤±0,5	≤±0,5
23 ... 350 °C (uncooled) %		≤±2	≤±2	≤±2,5
Thermal shock error				
at 9 bar p <sub>HI</sub> (1500 1/min)				
Δ p (short term)	bar	≤±0,25	≤±0,25	≤±0,2
Δ p <sub>HI</sub>	%	≤±2	≤±2	≤±1
Δ p <sub>max</sub>	%	≤±1	≤±1	≤±1
Dimensions	D mm	11,5	9,8	13,5
	L mm	8	8	10
Characteristics		Smallest water cooled sensor with M8 thread, excellent thermal drift stability due to water cooling. Double diaphragm with optimized thermal shock resistance, long life due to TiN coating and steel-sheathed cable.	As for Type 6041A... Probe for direct mounting in 10,0 mm hole.	Water cooled sensor with M10 thread, excellent thermal drift stability due to water cooling. Double diaphragm with optimized thermal shock resistance, long life due to TiN coating and steel-sheathed cable.
Data sheet		6041A_000-013	6043A_000-014	6061B_000-020
Mounting bore				



\*...U20 version (with reinforced diaphragm)

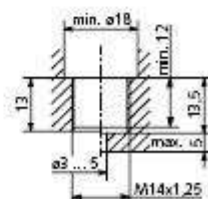
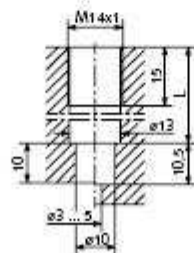
**Chlazené snímače KISTLER****Sensors, Water-cooled**

ø10 mm ThermoComp®  
pressure probe

M14 ThermoComp®  
quartz pressure sensor



Technical data	Type 6067C...	Type 7061B...
Measuring range	bar	0 ... 250/... 300*
Sensitivity	pC/bar	-25
Natural frequency	kHz	~90
Linearity	%FSO	≤±0,3
Temperature range	°C	-20 ... 350
Sensitivity change		
50 °C ± 35 °C (cooled)	%	≤±0,5
23 ... 350 °C (uncooled)	%	≤±2
Thermo shock error		
at 9 bar $p_{HI}$ (1500 1/min)		
$\Delta p$ (short term)	bar	≤±0,2
$\Delta p_{HI}$	%	≤±1
$\Delta p_{max}$	%	≤±1
Dimensions	D mm	9,9
	L mm	9,5
Characteristics	As Type 6061B... Special mounting sleeve for easy mounting and removal of sensor:	Water cooled sensor with M14 thread, extremely high sensitivity, excellent thermal drift stability due to water cooling. Double diaphragm with optimized thermal shock resistance, long life due to TiN coating and steel-sheathed cable. Reference sensor.
Data sheet	6067C_000-021	7061B_000-052

**Mounting bore**

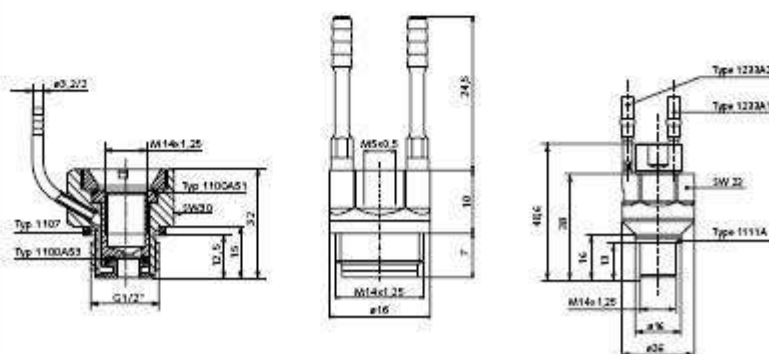
\*...U20 version (with reinforced diaphragm)

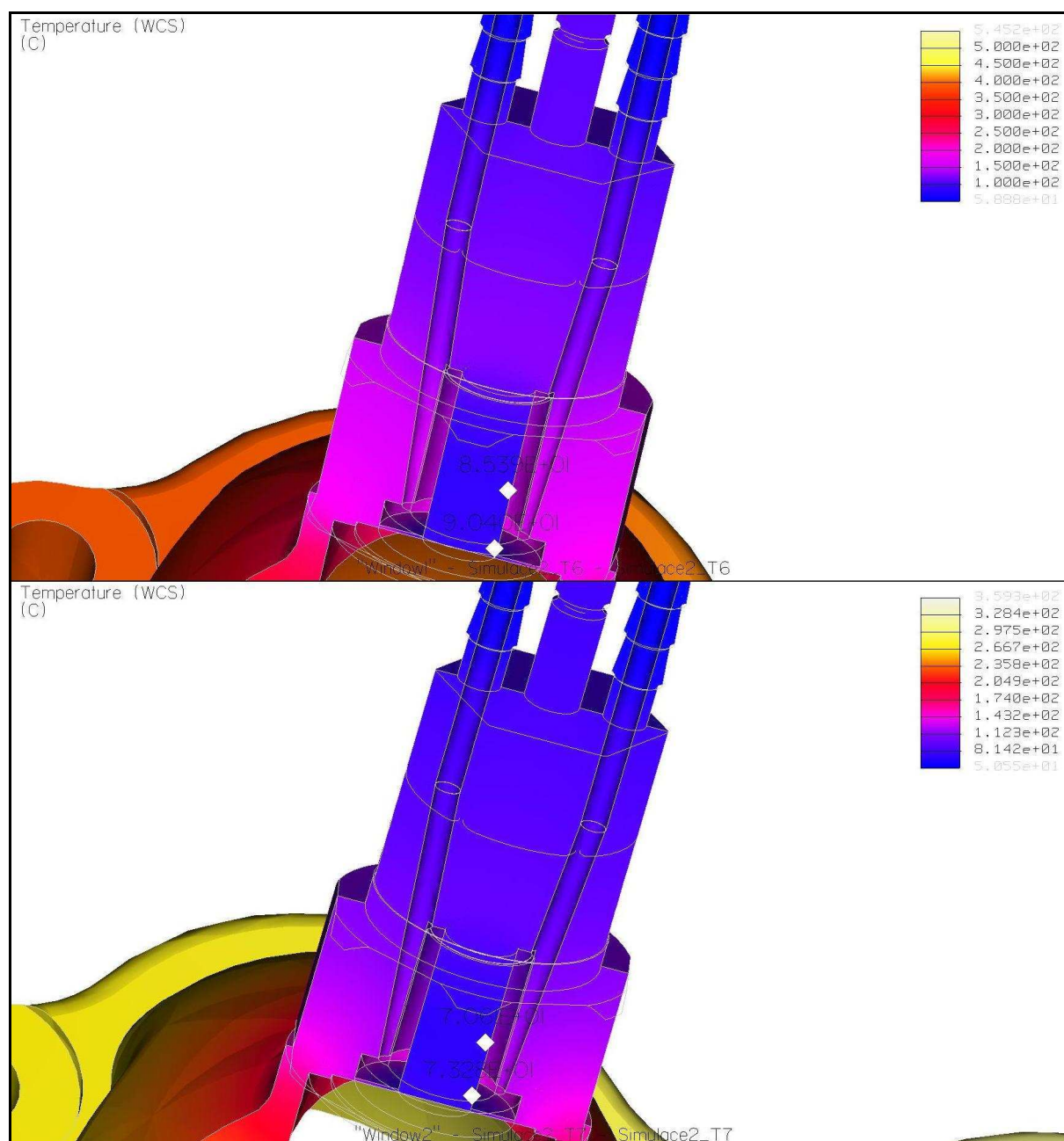
**Chladicí adaptéry KISTLER****Adapter****Cooling Adapters**

Switching cooling adapter

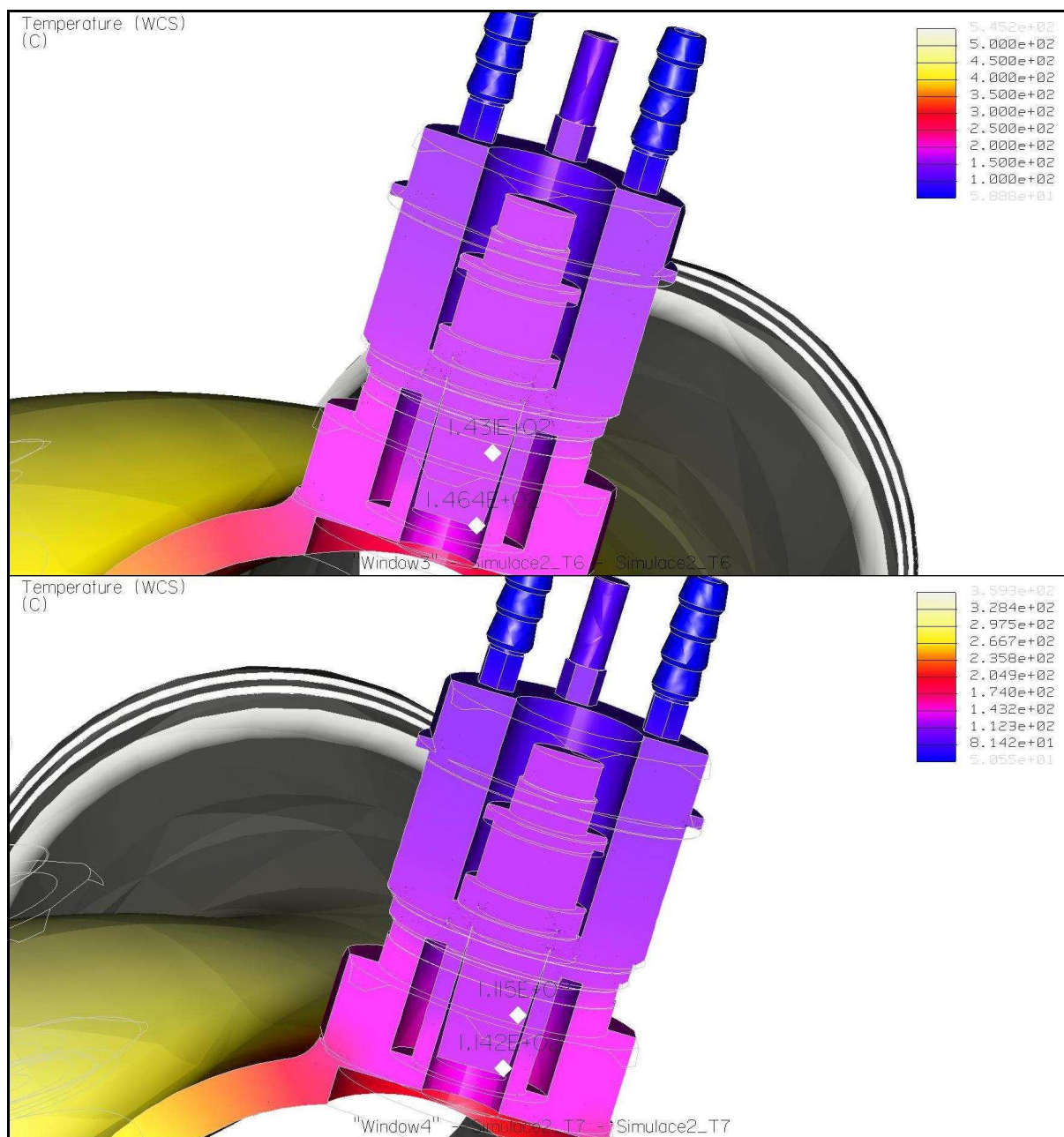


Technical data	Type 7511	Type 7525A...	Type 7533A...
Measured pressure bar	<35	<35	<15
Control air pressure bar	–	–	2 ... 6
Switching delay ms	–	–	10
Coolant flow rate l/min	0,8	0,5	0,5
Dimensions D mm	G1/2"	M14x1,25	M14x1,25
L mm	12,5	7	13
Weight g	260	20	185
Characteristics	Recommended sensors: Type 4045, Type 4075A... in Adapter Type 7501, Type 7507	Suitable sensors: undamped: A2 for Type 4005B/4007B...F damped: A6 for Type 4005B/4007B...F	Two pin switching adapter with water cooling for piezoresistive pressure sensors. Suitable sensors: A11 Type 4045 M14x1,25 A12 Type 4075A... M12x1 A14 Type 4005B/4007B...F
Data sheet	6501_000-070	7525_000-628	7533_000-606
Mounting bore			

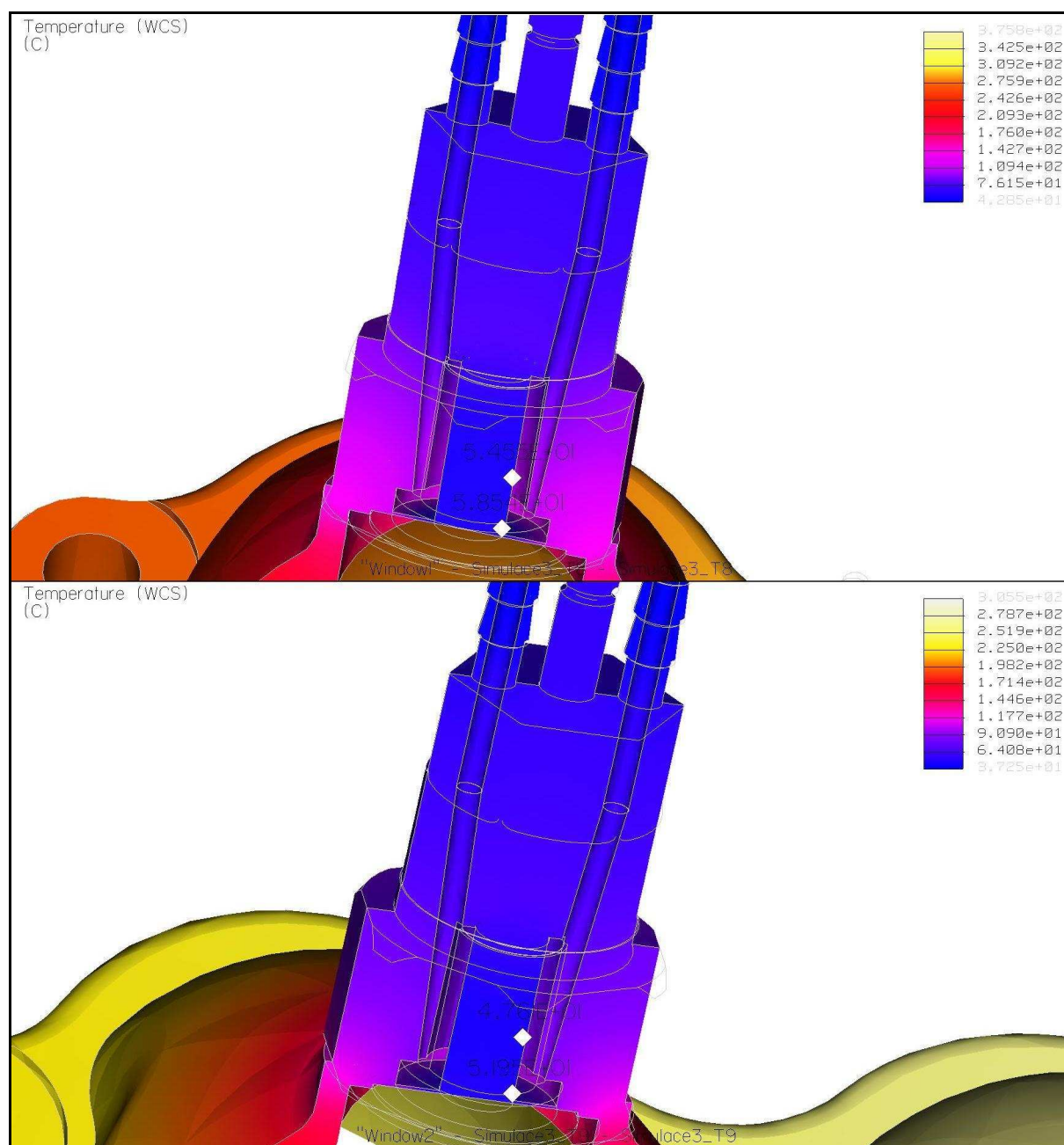


**Výsledky simulace 2 tepelného zatížení chlazeného snímače AVL QC43D**

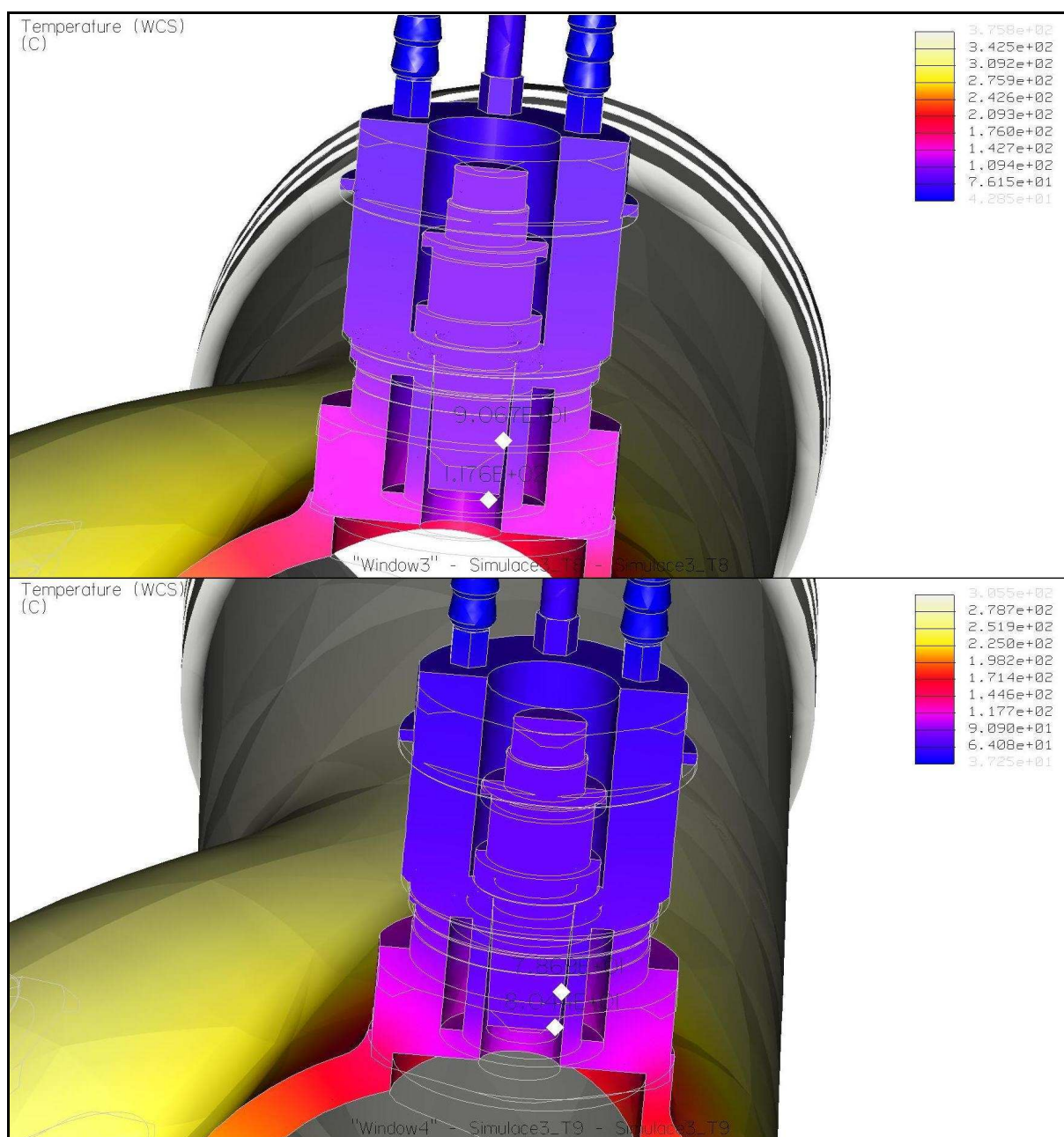


**Výsledky simulace 2 tepelného zatížení chladicího adaptéru AVL AE 02**

**Výsledky simulace 3 tepelného zatížení chlazeného snímače AVL QC43D**

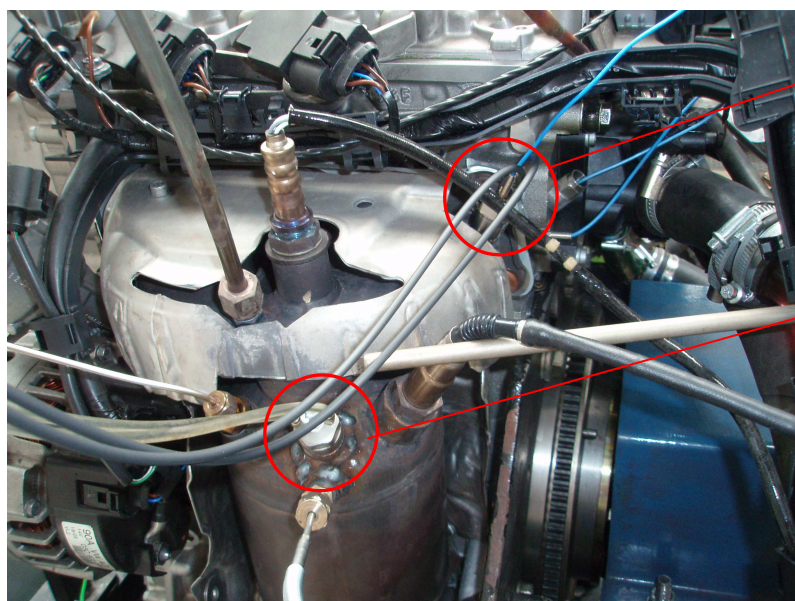


**Výsledky simulace 3 tepelného zatížení chladicího adaptéru AVL AE 02**





**Umístění chladících adaptérů pro měření**



Chlazený adaptér  
AVL AE 02

Chlazený adaptér  
AVL 4200.7

**Reálné vyhotovení chladícího systému**

